

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE DEFESA**

**AIRTON FERNANDES GURGEL JÚNIOR**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS MOVIMENTOS INDUZIDOS POR ONDAS  
SOBRE UM ENLACE NAVIO-COSTA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS NO  
ESPAÇO LIVRE**

**RIO DE JANEIRO  
2021**

AIRTON FERNANDES GURGEL JÚNIOR

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS MOVIMENTOS INDUZIDOS POR ONDAS  
SOBRE UM ENLACE NAVIO-COSTA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS NO  
ESPAÇO LIVRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia de Defesa.

Orientador(es): Vitor Gouvêa Andrezo Carneiro, D.Sc.  
José Carlos Araujo dos Santos, Ph.D.  
Claudio Alexis Rodríguez Castillo, D.Sc.

Rio de Janeiro

2021

©2021

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Gurgel Júnior, Airton Fernandes.

Estudo da Influência dos Movimentos Induzidos por Ondas Sobre um Enlace Navio-Costa de Comunicações Ópticas no Espaço Livre / Airton Fernandes Gurgel Júnior. – Rio de Janeiro, 2021.

107 f.

Orientador(es): Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro, José Carlos Araujo dos Santos e Claudio Alexis Rodríguez Castillo.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia de Defesa, 2021.

1. Óptica no Espaço Livre (FSO). 2. Operador de Amplitude de Resposta (RAO). 3. Sistema de comunicações marítimas. 4. Feixe Gaussiano desalinhado. 5. Função Q de Marcum. i. Carneiro, Vítor Gouvêa Andrezo (orient.) ii. Santos, José Carlos Araujo dos (orient.) iii. Castillo, Claudio Alexis Rodríguez (orient.) iv. Título

**AIRTON FERNANDES GURGEL JÚNIOR**

**Estudo da Influência dos Movimentos Induzidos por Ondas Sobre um Enlace Navio-Costa de Comunicações Ópticas no Espaço Livre**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia de Defesa.

Orientador(es): Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro, José Carlos Araujo dos Santos e Claudio Alexis Rodríguez Castillo.

Aprovado em Rio de Janeiro, 14 de julho de 2021, pela seguinte banca examinadora:

*Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro*

Prof. Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro - D.Sc. do IME - Presidente

*J. C. Araujo dos Santos*

Prof. José Carlos Araujo dos Santos - Ph.D. do IME

*Claudio Alexis Rodríguez Castillo*

Prof. Claudio Alexis Rodríguez Castillo - D.Sc. da UFRJ

*M. T. Rocco Giraldi*

Prof. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi - D.Sc. do IME

*Paulo de Tarso T. Esperança*

Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança - D.Sc. da UFRJ

Rio de Janeiro

2021

*Dedico este trabalho ao meu tio Wilton Ramalho (in memoriam), por me incentivar a aplicar os meus conhecimentos de engenharia nas Forças Armadas do meu país.*

# AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento de um trabalho científico ocorre em uma longa jornada, normalmente, permeada por inúmeros desafios, incertezas, frustrações, alegrias e muita evolução profissional e humana. Mas, apesar do processo, aparentemente solitário, a que qualquer pesquisador esteja destinado, ele reúne contributos de várias pessoas e instituições, indispensáveis para superar os percalços ao longo dessa trajetória.

Assim, trilhar esse caminho foi possível somente graças ao apoio, energia e força de pessoas e crenças, as quais reconheço, com imensa gratidão, nos parágrafos seguintes.

Aos meus pais, Airtton e Margarida, por inculcarem em minha mente valores morais essenciais, dentre eles, a fé cristã, a perseverança, a humildade e os sentidos de justiça e dever.

Aos Capitães de Fragata, Aderlan e Eduardo, militares prestigiados, do Corpo de Fuzileiros Navais, da Marinha do Brasil, pela designação para o cumprimento dessa missão, pelas orientações profissionais na carreira militar naval, pela camaradagem e espírito de corpo.

Ao Major Andrezo, Engenheiro Militar do Exército Brasileiro, Professor e Doutor, meus sinceros agradecimentos pela orientação exemplar, pautada por um elevado e rigoroso nível científico, um interesse permanente e fecundo, uma visão crítica e oportuna, um empenho inabalável e saudavelmente exigente, os quais contribuíram para enriquecer, com grande dedicação, passo por passo, todas as etapas subjacentes ao trabalho realizado.

Ao Professor Doutor Claudio, do Departamento de Engenharia Oceânica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelas formas generosa e prestativa, com as quais preencheu, por meio de suas orientações precisas, construtivas e essenciais, as lacunas de conhecimento, deste aluno, no campo da hidrodinâmica aplicada a sistemas navais.

Aos seguintes docentes, notáveis em suas áreas de conhecimento: Professor Araujo, pelas orientações e contribuições precisas na área de eletromagnetismo; Professora Maria Thereza, pelos ensinamentos na área de comunicações ópticas; e Professor Paulo de Tarso, pelas observações construtivas no campo da hidrodinâmica.

Ao Capitão Azzolin, do Exército Brasileiro, pelo "braço forte, mão amiga", ao longo dessa jornada científica. Aos amigos da Marinha do Brasil, Tales, Caio e Eclenice, alunos da engenharia de defesa, que assim como eu, um dia, sonharam em ter os seus nomes grafados em uma das placas, fixadas nas paredes dos corredores, do Instituto Militar de Engenharia, conceituada Instituição de Ensino Superior, à qual agradeço, especialmente, pela qualidade e intensidade dos estudos.

*"Somente fazemos melhor aquilo que repetidamente  
insistimos em melhorar. A busca da excelência  
não deve ser um objetivo, e sim um hábito."  
(Aristóteles)*

*"... eu não fui apenas aviador, mas que me foi necessário  
estudar, pensar, inventar e só depois voar."  
(Alberto Santos Dumont)*

## RESUMO

Neste trabalho é feita a análise da influência dos movimentos de um navio no desempenho de um enlace de comunicação óptica no espaço livre (FSO, do inglês "Free-Space Optics"), estabelecido entre o Comando da Força Tarefa-Anfíbia (embarcado) e o posto de comando da Força de Desembarque (em terra). Nesta análise, são estudados os principais fenômenos do canal, o que inclui as atenuações geométrica, atmosférica, por desalinhamento e por cintilação. O objetivo principal desse estudo é a análise da influência do comportamento hidrodinâmico do navio no desempenho de um enlace FSO. Para a análise do comportamento do navio em ondas oceânicas, foi empregada a teoria potencial linear no domínio da frequência. Pôde-se, assim, determinar o desalinhamento do feixe óptico transmitido, causado pelo movimento da embarcação nos seus seis graus de liberdade: avanço (*surge*), deriva (*sway*), afundamento (*heave*), balanço (*roll*), caturro (*pitch*) e guinada (*yaw*). Nesse sentido, a disponibilidade do enlace foi simulada, com base nas perdas geométricas e por desalinhamento, considerando um modelo de feixe com distribuição Gaussiana de potência, além dos demais fenômenos atmosféricos. Ao final deste estudo, foi observado, por meio das análises das curvas de RAO (*Response Amplitude Operator*), que as amplitudes das rotações de *pitch* e *yaw*, nos períodos de ressonância do navio, exercem uma grande influência no desempenho do sistema FSO. Os resultados são apresentados em função dos seguintes parâmetros da condição de mar: altura significativa, período de pico e ângulo de incidência de onda. Também são variados dois parâmetros do sistema FSO: ângulo de divergência e distância do enlace. Para o cálculo das perdas geométricas e por desalinhamento, foi adotada uma formulação matemática, que utiliza a função Q de Marcum como solução analítica para o cálculo da potência óptica recebida. Durante as simulações, foi comprovada a eficiência dessa expressão, em comparação ao método de integração numérica da função Gaussiana. Assim, entende-se que a metodologia desenvolvida neste estudo pode ser utilizada para otimizar o desempenho de enlaces FSO implementados em plataformas *offshore* sob a influência das ondas do mar.

**Palavras-chave:** Óptica no Espaço Livre (FSO). Operador de Amplitude de Resposta (RAO). Sistema de comunicações marítimas. Feixe Gaussiano desalinhado. Função Q de Marcum.

## ABSTRACT

This work analyzes the influence of ship's motions on the performance of a Free-Space Optics (FSO) communication link established between the Amphibious Task Force Command (onboard) and the Landing Force command post (on land). In this analysis, the main channel phenomena are studied, including geometric, atmospheric, misalignment and scintillation losses. The main objective of this study is to analyze the influence of the ship's hydrodynamic behavior on the performance of an FSO link. For the analysis of the behavior of the ship in oceanic waves, the linear potential theory in the frequency domain was used. Thus, it was possible to determine the misalignment of the transmitted optical beam, caused by the motions of the vessel in its six degrees of freedom: surge, sway, heave, roll, pitch and yaw. In this sense, the link availability was simulated, based on geometric and misalignment losses, considering a beam model with Gaussian power distribution, in addition to other atmospheric phenomena. At the end of this study, it was observed, through the analysis of the RAO (Response Amplitude Operator) curves, that the amplitudes of pitch and yaw rotations, in the vessel's resonance periods, exert a great influence on the FSO system performance. The results are presented as a function of the following sea condition parameters: significant height, peak period and wave incidence angle. Two FSO system parameters are also varied: divergence angle and link distance. For the calculation of geometric and misalignment losses, a mathematical formulation was adopted, which uses Marcum's  $Q$ -function as an analytical solution to calculate the received optical power. During the simulations, the efficiency of this expression was proven, compared to the numerical integration of the Gaussian function. Thus, it is understood that the methodology developed in this study can be used to optimize the performance of FSO links implemented in offshore platforms under the influence of ocean waves.

**Keywords:** Free-Space Optics (FSO). Response Amplitude Operator (RAO). Marine communication system. Misaligned Gaussian beams. Marcum  $Q$ -function.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Heliógrafo de Karl Gauss . . . . .   | 21 |
| Figura 1.2 – Alvos do espectro eletromagnético . . . . .  | 23 |
| Figura 1.3 – Emprego de enlaces FSO em sistemas de defesa . . . . .   | 24 |
| Figura 1.4 – Sistema FSO demonstrado pelo NRL em 2006 . . . . .   | 25 |
| Figura 1.5 – Terminal FSO do projeto TALON . . . . .  | 26 |
| Figura 1.6 – Instalação de terminal FSO em base terrestre em Okinawa . . . . .  | 27 |
| Figura 1.7 – Enlace de comunicações ópticas no espaço livre para OpAnf. . . . .   | 28 |
| Figura 2.1 – Ondas oceânicas: (a) <i>wind seas</i> ; (b) <i>swell</i> ; (c) <i>tsunami</i> ; e (d) de capilaridade. . . . . | 31 |
| Figura 2.2 – Características físicas das ondas oceânicas . . . . .  | 32 |
| Figura 2.3 – Boia meteoceanográfica . . . . .   | 33 |
| Figura 2.4 – Definição da altura significativa da onda . . . . .  | 34 |
| Figura 2.5 – Definição do período de pico da onda . . . . .   | 34 |
| Figura 2.6 – Região geográfica de interesse . . . . .   | 35 |
| Figura 2.7 – Definição das partes do casco de um navio . . . . .  | 37 |
| Figura 2.8 – US Army Ship American Mariner . . . . .  | 38 |
| Figura 2.9 – USNS American Mariner (T-AGM-12) . . . . .   | 38 |
| Figura 2.10 – Navio militar norueguês. . . . .  | 39 |
| Figura 2.11 – Antenas do navio <i>Mariner</i> . . . . .   | 39 |
| Figura 2.12 – Definição dos movimentos do navio e do ângulo de incidência de ondas. . . . .                                 | 40 |
| Figura 2.13 – Definição do sistema de referências do modelo hidrodinâmico. . . . .  | 42 |
| Figura 2.14 – Definição do sistema de referências do ponto $O$ . . . . .  | 42 |
| Figura 2.15 – Tanque oceânico . . . . .   | 45 |
| Figura 2.16 – Princípio da superposição . . . . .   | 47 |
| Figura 2.17 – Espectro de respostas do navio . . . . .  | 48 |
| Figura 3.1 – Elementos de um sistema de comunicações . . . . .  | 49 |
| Figura 3.2 – Modelo de propagação de feixe óptico . . . . .   | 50 |
| Figura 3.3 – Transceptor FSO . . . . .  | 51 |
| Figura 3.4 – Transmissão do feixe <i>beacon</i> em um sistema FSO . . . . .   | 53 |
| Figura 3.5 – Conversão de um feixe Gaussiano em um feixe " <i>top-hat</i> " . . . . .                                       | 54 |
| Figura 3.6 – Distribuição da intensidade do feixe óptico . . . . .  | 56 |
| Figura 3.7 – Cone de divergência da atenuação geométrica . . . . .  | 57 |
| Figura 3.8 – Desalinhamento do feixe óptico . . . . .   | 58 |
| Figura 3.9 – Possibilidades de desalinhamento do feixe cônico uniforme . . . . .  | 59 |
| Figura 3.10 – Decaimento da irradiância devido à absorção atmosférica . . . . .   | 61 |
| Figura 3.11 – Diagrama de espalhamento: (a) Rayleigh, (b) Mie, (c) Não-seletivo . . . . .                                   | 62 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.12–Turbulência atmosférica . . . . .  | 65  |
| Figura 4.1 – Fluxograma da modelagem dos sistemas. . . . .   | 69  |
| Figura 4.2 – Curvas de RAO no ponto <i>O</i> do navio <i>Mariner</i> . . . . .   | 72  |
| Figura 4.3 – Série temporal da elevação de onda para o estado de mar ( $H_s = 0,25$<br>m, $T_p = 11$ s, $\chi = 135^\circ$ ). . . . .                          | 74  |
| Figura 4.4 – Séries temporais dos movimentos do FSO TX no ponto <i>B</i> para o estado<br>de mar ( $H_s = 0,25$ m, $T_p = 11$ s, $\chi = 135^\circ$ ). . . . . | 74  |
| Figura 4.5 – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes<br>ângulos de divergência ( $L = 3$ km, $\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .    | 76  |
| Figura 4.6 – Potência recebida em função do tempo para diferentes ângulos de<br>divergência ( $L = 3$ km, $\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .                   | 76  |
| Figura 4.7 – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes<br>ângulos de divergência ( $L = 3$ km, $\alpha_{atm} = 2$ dB/km). . . . .    | 77  |
| Figura 4.8 – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes<br>distâncias ( $\theta = 3,5$ mrad, $\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .       | 78  |
| Figura 4.9 – Potência recebida em função do tempo para diferentes distâncias ( $\theta = 3,5$ mrad,<br>$\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .                      | 79  |
| Figura 4.10–Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes<br>distâncias ( $\theta = 3,5$ mrad, $\alpha_{atm} = 2$ dB/km). . . . .        | 80  |
| Figura 4.11–Potência recebida em função do tempo para diferentes distâncias ( $\theta = 3,5$ mrad,<br>$\alpha_{atm} = 2$ dB/km). . . . .                       | 80  |
| Figura 4.12–Histograma de faixas de disponibilidade para o sistema FSO n° 1. . . . .   | 83  |
| Figura 4.13–Histograma de faixas de disponibilidade para o sistema FSO n° 2. . . . .   | 84  |
| Figura 4.14–Probabilidade cumulativa de ocorrência para cada faixa de taxa de<br>disponibilidade ( $L = 3$ km e $\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .             | 84  |
| Figura 4.15–Taxa de Disponibilidade Média em função da Altura Significativa de<br>Onda ( $L = 3$ km e $\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .                       | 85  |
| Figura 4.16–Taxa de Disponibilidade Média em função do Período de Pico ( $L = 3$ km<br>e $\alpha_{atm} = 1$ dB/km). . . . .                                    | 86  |
| Figura A.1–Arquivo de entrada do programa HANSEL (n° 1). . . . .   | 98  |
| Figura A.2–Arquivo de entrada do programa HANSEL (n° 2). . . . .   | 99  |
| Figura A.3–Balizas do navio <i>Mariner</i> : (a) Seções de Popa, (b) Seções de Proa. . . . .   | 100 |
| Figura A.4–Arquivo de saída do programa HANSEL. . . . .  | 103 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Estatísticas de Ondas . . . . .   | 33 |
| Tabela 2.2 – Diagrama de Dispersão de Mar . . . . .  | 35 |
| Tabela 2.3 – Características Principais do Navio . . . . .   | 37 |
| Tabela 2.4 – Movimentos do Navio. . . . .  | 41 |
| Tabela 2.5 – Levantamento das Curvas de RAO. . . . .   | 46 |
| Tabela 3.1 – Perdas no Canal Óptico . . . . .  | 61 |
| Tabela 3.2 – Código Internacional de Visibilidade . . . . .  | 64 |
| Tabela 4.1 – Parâmetros do Sistema FSO. . . . .  | 75 |
| Tabela 4.2 – Análise da Influência dos Ângulos de Divergência. . . . .   | 77 |
| Tabela 4.3 – Desempenho dos Sistemas FSO. . . . .  | 81 |
| Tabela 4.4 – Diagrama de Taxas de Disponibilidades do Sistema FSO n° 1 ( $\theta = 1,0$ mrad,<br>$L = 3$ km, $\alpha_{atm} = 1$ dB/km) . . . . . | 82 |
| Tabela 4.5 – Diagrama de Taxas de Disponibilidades do Sistema FSO n° 2 ( $\theta = 3,5$ mrad,<br>$L = 3$ km, $\alpha_{atm} = 1$ dB/km) . . . . . | 83 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |   |
|-----------|---|
| A.P       | Perpendicular de Ré ( <i>Afterward Perpendicular</i> )  |
| ATP       | Aquisição, Rastreamento e Apontamento ( <i>Acquisition, Tracking and Pointing</i> )                                       |
| COMNALOC  | COMando NAval LOCal   |
| DWL       | Linha d' água de projeto ( <i>Design Waterline</i> )  |
| ForDbq    | Força de Desembarque  |
| ForTarAnf | Força Tarefa Anfíbia  |
| FSM       | Espelho de Direção Rápida ( <i>Fast Steering Mirror</i> )   |
| FSO       | Óptica no Espaço Livre ( <i>Free-Space Optics</i> )   |
| FOV       | Campo de Visão ( <i>Field Of View</i> )   |
| F.P       | Perpendicular de Vante ( <i>Forward Perpendicular</i> )   |
| FWHM      | Largura Completa à meia Altura ( <i>Full Width at Half Maximum</i> )  |
| HF        | Alta Frequência ( <i>High Frequency</i> )   |
| LASER     | Luz Amplificada por Emissão de Radiação Estimulada ( <i>Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation</i> ) |
| LED       | Diodo Emissor de Luz ( <i>Light Emitting Diode</i> )  |
| LOA       | Comprimento Total do Navio( <i>Length Over All</i> )  |
| LWL       | Linha d' Água ( <i>Load Water Line</i> )  |
| NRL       | Laboratório de Pesquisas Navais ( <i>Naval Research Laboratory</i> )  |
| OpAnf     | Operação Anfíbia  |
| TALON     | Rede Óptica Tática por Linha de Visada ( <i>Tactical Line-of-sight Optical Network</i> )                                  |
| RAO       | Operador de Amplitude de Resposta ( <i>Response Amplitude Operator</i> )  |

|     |  |
|-----|--|
| RF  | RadioFrequência  |
| VHF | Frequência Muito Alta ( <i>Very High Frequency</i> )       |
| UHF | Frequência Extramente Alta ( <i>Ultra High Frequency</i> ) |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |
|-----------|---|
| $A_r$     | Área de abertura do receptor FSO  |
| $A_r^P$   | Projeção de $A_r$ em $A_{SR}$   |
| $A_t$     | Área de abertura do transmissor FSO                                     |
| $A_{SR}$  | Área da seção reta do feixe óptico                                      |
| $B_s$     | Boca do navio   |
| $C_n^2$   | Parâmetro estrutural do índice de refração                              |
| $C_s$     | Calado do navio   |
| $d$       | Desalinhamento total do feixe óptico                                    |
| $d_o$     | Distância entre o plano transmissor e o vértice do cone do feixe óptico |
| $d_{max}$ | Desalinhamento máximo admitido pelo enlace FSO                          |
| $d_v$     | Desvio angular do feixe óptico provocado pelo movimento de <i>pitch</i> |
| $d_\phi$  | Desvio angular do feixe óptico provocado pelo movimento de <i>roll</i>  |
| $d_\psi$  | Desvio angular do feixe óptico provocado pelo movimento de <i>yaw</i>   |
| $d_{xp}$  | Desvio lateral do feixe óptico provocado pelo movimento $x_p$           |
| $d_{yp}$  | Desvio vertical do feixe óptico provocado pelo movimento $y_p$          |
| $d_{zp}$  | Desvio longitudinal do feixe óptico provocado pelo movimento $z_p$      |
| $D_t$     | Diâmetro de abertura do transmissor FSO                                 |
| $D_r$     | Diâmetro de abertura do receptor FSO                                    |
| $d_{SR}$  | Diâmetro da seção reta do feixe óptico                                  |
| $D_w$     | Declividade da onda oceânica  |
| $F_n$     | Número de Froude  |
| $g$       | Aceleração da gravidade   |
| $H$       | Altura da onda oceânica   |
| $h$       | Profundidade do leito marinho   |

|               |  |
|---------------|--|
| $h_a$         | Amplitude do movimento harmônico composto no ponto $P$                 |
| $H_m$         | Altura média da onda oceânica  |
| $H_r$         | Altura relativa da onda oceânica                                       |
| $H_s$         | Altura significativa das ondas oceânicas                               |
| $H_{srp}$     | Valor representativo do intervalo de classe das alturas significativas |
| $I$           | Intensidade óptica ou Irradiância                                      |
| $I_0$         | Intensidade óptica máxima  |
| $I_L$         | Irradiância do feixe óptico na distância $z = L$                       |
| $I_t$         | Irradiância do feixe óptico transmitido                                |
| $k$           | Número de onda   |
| $L$           | Comprimento do enlace FSO  |
| $L_s$         | Comprimento total do navio   |
| $L_w$         | Comprimento da onda oceânica   |
| $P_{RX}$      | Potência óptica recebida   |
| $P_s$         | Pontal do navio  |
| $P_{TX}$      | Potência óptica transmitida  |
| $r$           | Distância radial do centro do feixe óptico                             |
| $R_b$         | Taxa de transmissão de dados   |
| $R_{bef}$     | Taxa de transmissão efetiva do sistema FSO                             |
| $r_p$         | Raio da partícula suspensa na atmosfera                                |
| $R_p$         | Taxa de precipitação   |
| $S_{ia}$      | Amplitude de resposta do $i$ -ésimo grau de liberdade de movimento     |
| $S_j(\omega)$ | Função densidade espectral   |
| $S_r$         | Sensibilidade do receptor FSO  |
| $S_z$         | Espectro de resposta do cruzamento espectral                           |
| $S_\zeta$     | Espectro de resposta do mar  |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $t_f$           | Tempo de funcionamento do enlace FSO  |
| $t_T$           | Tempo total de simulação do enlace FSO  |
| $T$             | Período da onda oceânica  |
| $T_p$           | Período de pico das ondas oceânicas   |
| $T_{prp}$       | Valor representativo do intervalo de classe dos períodos de pico de mar       |
| $U_s$           | Velocidade de avanço do navio   |
| $x_0$           | Parâmetro dimensional das partículas atmosféricas                             |
| $x$             | Mov. de translação do navio na direção do eixo transversal ( <i>sway</i> )    |
| $x_a$           | Amplitude do movimento de <i>sway</i> no ponto $O$                            |
| $x_c$           | Translação do pico do feixe Gaussiano na direção do eixo x                    |
| $x_p$           | Movimento harmônico composto no eixo transversal do ponto $P$                 |
| $y$             | Movimento de translação do navio na direção do eixo vertical ( <i>heave</i> ) |
| $y_a$           | Amplitude do movimento de <i>heave</i> no ponto $O$                           |
| $y_c$           | Translação do pico do feixe Gaussiano na direção do eixo y                    |
| $YG$            | Posição vertical do centro de gravidade do navio                              |
| $y_p$           | Movimento harmônico composto no eixo vertical do ponto $P$                    |
| $z$             | Mov. de translação do navio na direção do eixo longitudinal ( <i>surge</i> )  |
| $z_a$           | Amplitude do movimento de <i>surge</i> no ponto $O$                           |
| $z_c$           | Translação do pico do feixe Gaussiano na direção do eixo z                    |
| $z_p$           | Movimento harmônico composto no eixo longitudinal do ponto $P$                |
| $ZG$            | Posição longitudinal do centro de gravidade do navio                          |
| $\alpha_{atm}$  | Coefficiente de atenuação atmosférica   |
| $\alpha_{cint}$ | Coefficiente de atenuação por cintilação                                      |
| $\alpha_{geo}$  | Coefficiente de atenuação geométrica  |
| $\alpha_{gm}$   | Perdas geométricas e por desalinhamento                                       |
| $\alpha_m$      | Absorção causada pelos gases presentes na atmosfera                           |

|                        |   |
|------------------------|---|
| $\alpha_{RX}$          | Perdas por inserção do receptor FSO   |
| $\alpha_s$             | Absorção causada por partículas sólidas e líquidas presentes na atmosfera   |
| $\alpha_{TX}$          | Perdas por inserção do transmissor FSO                                      |
| $\beta$                | Coefficiente de espalhamento por chuvas                                     |
| $\gamma$               | Fator de picosidade do espectro de mar de JONSWAP                           |
| $\epsilon_{x\zeta}$    | Ângulo de fase entre o movimento de <i>sway</i> e a onda de entrada         |
| $\epsilon_{h\zeta}$    | Ângulo de fase do movimento harmônico composto                              |
| $\epsilon_{y\zeta}$    | Ângulo de fase entre o movimento de <i>heave</i> e a onda de entrada        |
| $\epsilon_{z\zeta}$    | Ângulo de fase entre o movimento de <i>surge</i> e a onda de entrada        |
| $\epsilon_{v\zeta}$    | Ângulo de fase entre o movimento de <i>pitch</i> e a onda de entrada        |
| $\epsilon_{\phi\zeta}$ | Ângulo de fase entre o movimento de <i>roll</i> e a onda de entrada         |
| $\epsilon_{\psi\zeta}$ | Ângulo de fase entre o movimento de <i>sway</i> e a onda de entrada         |
| $\zeta_a$              | Amplitude das ondas regulares   |
| $\eta$                 | Taxa de desempenho do sistema FSO   |
| $\theta$               | Ângulo de divergência   |
| $\lambda$              | Comprimento de onda   |
| $\lambda_f$            | Comprimento de onda do feixe óptico   |
| $\lambda_b$            | Comprimento de onda do feixe de controle ( <i>beacon</i> )                  |
| $\sigma$               | Parâmetro de forma do espectro de mar JONSWAP                               |
| $\sigma_R$             | Variância de Rytov  |
| $\sigma_I$             | Índice de cintilação  |
| $\tau$                 | Índice de atenuação atmosférica   |
| $v$                    | Movimento de rotação do navio em torno do eixo transversal ( <i>pitch</i> ) |
| $v_a$                  | Amplitude do movimento de <i>pitch</i> no ponto $O$                         |
| $\phi$                 | Movimento de rotação do navio em torno do eixo longitudinal ( <i>roll</i> ) |
| $\phi_a$               | Amplitude do movimento de <i>roll</i> no ponto $O$                          |

|            |  |
|------------|--|
| $\chi$     | Ângulo de incidência de onda   |
| $\psi$     | Movimento de rotação do navio em torno do eixo vertical ( <i>yaw</i> ) |
| $\psi_a$   | Amplitude do movimento de <i>yaw</i> no ponto <i>O</i>                 |
| $\omega_w$ | Frequência das ondas oceânicas   |
| $\omega_e$ | Frequência de encontro entre o navio e as ondas oceânicas              |
| $\omega_p$ | Frequência de pico das ondas oceânicas                                 |

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                 | <b>21</b> |
| 1.1      | ESTADO DA ARTE                                    | 24        |
| 1.2      | CONTEXTO E MOTIVAÇÃO                              | 26        |
| 1.3      | OBJETIVO  | 29        |
| 1.4      | ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO                        | 29        |
| <b>2</b> | <b>HIDRODINÂMICA DE SISTEMAS NAVAIS</b>           | <b>30</b> |
| 2.1      | ONDAS OCEÂNICAS                                   | 30        |
| 2.1.1    | CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ONDAS OCEÂNICAS        | 30        |
| 2.1.2    | CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS                           | 31        |
| 2.1.3    | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS ONDAS                 | 31        |
| 2.1.4    | CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE MAR                   | 32        |
| 2.1.5    | ESPECTRO DE MAR                                   | 36        |
| 2.2      | CASCO DO NAVIO                                    | 36        |
| 2.2.1    | MOVIMENTOS DO NAVIO                               | 40        |
| 2.3      | ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE ONDA                      | 41        |
| 2.4      | SISTEMAS DE REFERÊNCIAS                           | 41        |
| 2.5      | FREQUÊNCIA DE ENCONTRO                            | 42        |
| 2.6      | SUPERPOSIÇÃO DE MOVIMENTOS                        | 43        |
| 2.7      | COMPORTAMENTO NO MAR                              | 44        |
| 2.8      | PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO LINEAR                  | 46        |
| 2.9      | ESPECTRO DE RESPOSTAS                             | 48        |
| <b>3</b> | <b>COMUNICAÇÕES ÓPTICAS NO ESPAÇO LIVRE</b>       | <b>49</b> |
| 3.1      | SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES                      | 49        |
| 3.2      | SISTEMA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS                   | 50        |
| 3.3      | SISTEMA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS NO ESPAÇO LIVRE   | 51        |
| 3.3.1    | TRANSCEPTOR FSO                                   | 51        |
| 3.3.1.1  | TRANSMISSOR                                       | 51        |
| 3.3.1.2  | RECEPTOR  | 52        |
| 3.3.1.3  | SISTEMA ATP                                       | 52        |
| 3.4      | PROPAGAÇÃO DO FEIXE ÓPTICO NO MEIO NÃO GUIADO     | 53        |
| 3.4.1    | MODELOS DE PROPAGAÇÃO DO FEIXE ÓPTICO             | 53        |
| 3.5      | DIFRAÇÃO, DIVERGÊNCIA E GEOMETRIA DE CAPTAÇÃO     | 55        |
| 3.6      | DESALINHAMENTO DO FEIXE ÓPTICO GAUSSIANO CIRCULAR | 58        |
| 3.6.1    | PERDAS GEOMÉTRICAS E POR DESALINHAMENTO           | 59        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.7      | FENÔMENOS NO ESPAÇO LIVRE . . . . .                            | 61         |
| 3.7.1    | ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA . . . . .                                | 61         |
| 3.7.2    | TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA . . . . .                              | 63         |
| 3.7.2.1  | ATENUAÇÃO POR CINTILAÇÃO . . . . .                             | 66         |
| 3.8      | ANÁLISE DE DESEMPENHO . . . . .                                | 67         |
| <b>4</b> | <b>SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>            | <b>69</b>  |
| 4.1      | DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS SIMULADOS . . . . .                     | 69         |
| 4.2      | SUBSISTEMA HIDRODINÂMICO . . . . .                             | 70         |
| 4.2.1    | PARÂMETROS DE ENTRADA . . . . .                                | 70         |
| 4.2.2    | FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO NAVIO . . . . .                    | 70         |
| 4.2.3    | PARÂMETROS DE SAÍDA . . . . .                                  | 73         |
| 4.3      | SUBSISTEMA ÓPTICO . . . . .                                    | 73         |
| 4.3.1    | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SISTEMA FSO . . . . .  | 75         |
| 4.3.1.1  | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE DIVERGÊNCIA . . . . .       | 75         |
| 4.3.1.2  | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DO ENLACE . . . . .       | 78         |
| 4.4      | DESEMPENHO DO SISTEMA FSO . . . . .                            | 81         |
| 4.4.1    | TAXAS DE DISPONIBILIDADES DOS SISTEMAS FSO . . . . .           | 81         |
| 4.5      | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS ESTADOS DE MAR . . . . .             | 85         |
| 4.5.1    | ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDAS . . . . .                        | 85         |
| 4.5.2    | PERÍODO DE PICO . . . . .                                      | 86         |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO . . . . .</b>                                     | <b>87</b>  |
|          | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                   | <b>90</b>  |
|          | <b>A – CÓDIGO HANSEL . . . . .</b>                             | <b>97</b>  |
| A.1      | CONFIGURAÇÕES DO PROGRAMA HANSEL . . . . .                     | 97         |
| A.1.1    | DADOS DE ENTRADA . . . . .                                     | 97         |
| A.1.2    | DADOS DE SAÍDA . . . . .                                       | 101        |
|          | <b>B – FUNÇÃO Q DE MARCUM COMO SOLUÇÃO ANALÍTICA . . . . .</b> | <b>104</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização da luz em sistemas de comunicação militar não é uma inovação contemporânea, pois registros históricos comprovam que gregos e romanos costumavam utilizar seus escudos de metal polido para refletir a luz solar e transmitir informações no campo de batalha (KHALIGHI; UYSAL, 2014). Posteriormente, já no final do século XIX, o princípio básico de funcionamento desse sistema de comunicação tática foi novamente empregado, porém em um sofisticado sistema de sinalização, combinando luz e espelhos. É nesse contexto que o cientista alemão Karl Gauss promoveu o primeiro avanço tecnológico em direção ao desenvolvimento de um sistema técnico de óptica militar. Em 1821, Gauss desenvolveu um aparato capaz de direcionar um feixe de luz solar, por meio de um espelho, para uma estação distante, com o propósito de auxiliar nas tarefas de levantamentos geodésicos na região de Hanover, na Alemanha. Com a invenção do código Morse, o heliógrafo de Gauss deixou de ser um instrumento meramente topográfico e assumiu um importante papel nos conflitos armados (STERLING, 2008).

A Figura 1.1 ilustra uma aplicação do dispositivo de sinalização heliográfica, amplamente utilizado pelas forças britânicas no final do século XIX durante as guerras coloniais na África e na Ásia. O aparato de Gauss foi, também, utilizado pelo Exército Norte Americano durante os conflitos armados contra tribos indígenas (STERLING, 2008).



**Figura 1.1** – Heliógrafo de Karl Gauss (STERLING, 2008).

Em 1880, Graham Bell desenvolveu um dispositivo, que utilizava a luz solar como portadora para a transmissão de um sinal de voz (AGRAWAL, 2002). Essa inovação, também conhecida como fofone, não foi comercializada, porém, houve um forte interesse em utilizá-la no campo tático. Nesse sentido, anos mais tarde, o invento de Bell foi adaptado, a fim de atender às necessidades militares. Desse modo, a luz solar desse aparato foi substituída por lâmpadas de arco e estas foram utilizadas como fontes emissoras de luz,

possibilitando, assim, o estabelecimento de enlaces de comunicação no teatro de operações (UYSAL et al., 2016).

No entanto, o primeiro experimento realizado em laboratório com um feixe *laser*, emitido por um cristal de rubi (MAIMAN, 1960), em 1960, é visto como o marco da era moderna das comunicações ópticas. Posteriormente, na mesma década, desenvolveu-se a fibra óptica e logo percebeu-se que ela seria uma solução potencial para o transporte de sinais ópticos em sistemas de comunicação. Nesse sentido, observou-se que as fibras seriam capazes de guiar o feixe de luz, de forma semelhante à condução de elétrons em fios de cobre (AGRAWAL, 2002), reduzindo, assim, as perdas intrínsecas do espaço livre. Além disso, percebeu-se que o confinamento de um feixe *laser* em um cabeamento óptico poderia contornar algumas distorções de sinais elétricos, recorrentes nas comunicações militares. Assim, em 1970, a Marinha dos EUA instalou um *link* telefônico de fibra óptica a bordo do *USS Little Rock*, com o objetivo de eliminar a interferência eletromagnética entre os dispositivos eletrônicos desse navio (STERLING, 2008).

No entanto, apesar das relevantes descobertas no campo da fotônica, os sistemas de comunicações ópticas foram escassamente empregados nos campos de batalha entre 1970 e 1990. Em contrapartida, houve um emprego preponderante da radiofrequência (RF) e das técnicas de processamento digital de sinais nos sistemas de defesa (KAUSHAL; KADDOUM, 2017a). Contudo, atualmente, especialistas acreditam que o espectro de RF será insuficiente para suprir as demandas crescentes das tecnologias 5G e do paradigma da IoT (*Internet of Things*) (CHOWDHURY et al., 2018).

Similarmente, cresce de modo considerável a demanda por tecnologias de banda larga nos conflitos armados da era contemporânea. Compreende-se que esse aumento é uma consequência da expansão dos segmentos do combate moderno. Nesse contexto, a guerra foi inicialmente marcada pelos duelos entre os exércitos no domínio terrestre. Posteriormente, essa dimensão do combate foi rapidamente extrapolada, tendo como sustentáculos, os grandes avanços científico e tecnológicos, que marcaram a história da humanidade. Assim, as páginas da história militar passaram a registrar os grandes confrontos nos domínios marítimo e aéreo e a expansão do combate nos segmentos espacial e cibernético.

Na medida em que o combate avançou nos múltiplos domínios, aumentou a necessidade de garantir a interoperabilidade entre os meios e os sistemas integrantes dessa estrutura de defesa. Nesse sentido, é perceptível que essa demanda elevou o grau de complexidade durante as fases da condução da guerra e impôs novos desafios para as atividades de Comando e Controle (C2). Assim, o C2 foi se ajustando às operações multi-domínios, agregando outras estruturas a esse acrônimo, como: Comunicações, Computação, Defesa Cibernética, Sistemas de Combate, Inteligência, Vigilância, Reconhecimento. Assim, criou-se um novo conceito: C6IVR (DANIEL, 2020).

As fusões entre essas estruturas mostram a dependência entre essas atividades de

apoio ao combate e também evidenciam um irrefutável aumento dos sensores e do fluxo de informações no campo de batalha. Espera-se, assim, que um sistema de comunicação militar seja capaz de escoar esse volume considerável de informações, de forma rápida e segura, a fim de proporcionar uma consciência situacional adequada ao elemento decisor.

Apesar dos sistemas tradicionais de radiocomunicação por RF serem mais eficientes e, conseqüentemente, amplamente empregados em algumas frentes de combate, eles tornaram-se altamente vulneráveis às ameaças em tempo real, desencadeadas pelos sistemas de guerra eletrônica da força adversa (KAUSHAL; KADDOUM, 2017a). A Figura 1.2 ilustra alguns possíveis alvos do espectro eletromagnético.



**Figura 1.2** – Alvos do espectro eletromagnético (ELSWORTH, 2010).

Além dessa vulnerabilidade, os sistemas RF operam com uma largura de banda restrita, com alta latência e demandam maior potência, possuindo, assim, maior volume e peso em relação aos sistemas de comunicações ópticas no espaço livre (FSO) (CHOWDHURY et al., 2018). Os sistemas FSO, em contrapartida, operam com uma portadora óptica de alta frequência, contida em um feixe de luz, transmitindo, assim, um volume considerável de informações de voz, dados e vídeo no teatro de operações, em comparação à radiocomunicação por RF ou por microondas (KAUSHAL; KADDOUM, 2017a). A baixa probabilidade de detecção, interceptação e interferência proposital (*jamming*) no feixe óptico transmitido são outras vantagens, que favorecem o emprego dessa tecnologia em sistemas de defesa (RABINOVICH et al., 2015).

Em comparação às comunicações ópticas por fibra, os sistemas FSO são altamente reconfiguráveis (CARNEIRO, 2013), proporcionando mobilidade a uma determinada estrutura de defesa. Além da imunidade à interferência eletromagnética, os enlaces FSO possuem um alto grau de segurança física, devido à utilização de um feixe óptico altamente

diretivo, representado por ângulos de divergência entre 0,05 e 10 mrad (BLOOM et al., 2003).

A Figura 1.3 mostra algumas possíveis aplicações de enlaces FSO em sistemas de defesa.



**Figura 1.3** – Emprego de enlaces FSO em sistemas de defesa (KAUSHAL; KADDOUM, 2017a).

Se por um lado a alta diretividade do feixe óptico proporciona maior segurança às comunicações, por outro, representa um desafio para os técnicos, engenheiros e cientistas que buscam a implementação desses sistemas em plataformas móveis. Assim, sabe-se que os erros de apontamento provocados pelo desalinhamento entre dois transceptores FSO, provenientes da vibração das bases dos equipamentos, dos erros ou da imprecisão do sistema de *tracking*, podem degradar o desempenho do sistema e até mesmo interromper o funcionamento do enlace (CHEN, 2017). Além disso, a tecnologia FSO também é vulnerável aos diversos fenômenos atmosféricos, tais como nevoeiro, nuvens baixas, chuva, neve, poeira e turbulência (MOURA, 2004).

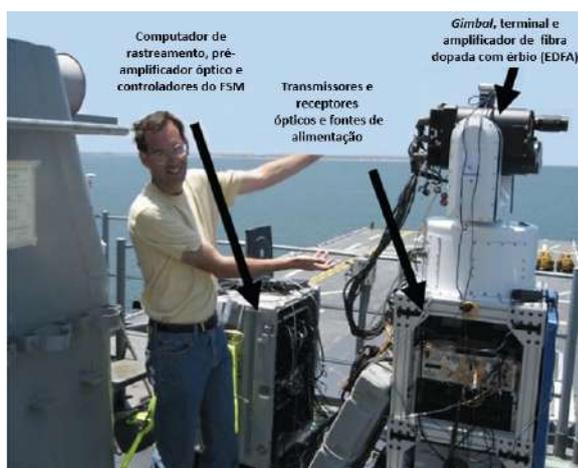
Com o propósito de superar essas adversidades e usufruir das vantagens potenciais dessa tecnologia em sistemas de comunicações militares, a Marinha dos EUA vem concentrando esforços de pesquisa para implementar enlaces marítimos de comunicações FSO.

## 1.1 Estado da Arte

No ano de 1976, pesquisadores do Laboratório de Pesquisas Navais dos EUA (*USA Naval Research Laboratory - NRL*) realizaram o primeiro teste de comunicações FSO entre embarcações. Para tanto, utilizaram um sistema de integração eletro-óptico, equipado com *laser* de  $CO_2$  e um mecanismo de Aquisição, Rastreamento e Apontamento (do inglês,

*Acquisition, Tracking and Pointing* - ATP) (GIANNARIS; MOORADIAN, 1977). Esse projeto, também conhecido como OCCULT (*Optical Covert Communications Using Laser Transceivers*), foi visto naquela época como uma solução promissora, capaz de atender às necessidades de transmissão de informações ultrassecretas entre os navios da Marinha dos Estados Unidos. Os sistemas de integração foram instalados em duas plataformas marítimas, separadas por uma distância aproximada de 10 m. Assim, sob a influência do movimento das ondas oceânicas, foram realizadas transmissões simultâneas de sinais analógicos e digitais, por meio de quatro canais de 20 kHz e um canal digital de 20 kbps, respectivamente.

No ano de 2006, o NRL uniu-se à empresa Novasol Inc., com o objetivo de realizar um teste de comunicações FSO de alto desempenho entre os navios da Marinha Estadunidense, durante um exercício militar realizado nas regiões de San Diego (Califórnia) e Honolulu (Havaí) (RABINOVICH et al., 2015). Os autores mencionam que essa foi a primeira demonstração do emprego de um sistema de comunicações a *laser* em enlaces marítimos, operando com banda larga, durante uma operação naval. A Figura 1.4 mostra alguns detalhes do sistema instalado a bordo dos navios.



**Figura 1.4** – Sistema FSO demonstrado pelo NRL em 2006 (RABINOVICH et al., 2010).

Esses terminais preservaram algumas características dos subsistemas do projeto OCCULT. Similarmente, foram equipados com subsistemas de apontamento de baixa e alta resolução. Porém, os novos transceptores foram projetados com dispositivos FSM (*Fast Steering Mirrors*) e estabilizadores (*gimbals*).

Assim, durante o traslado dos navios de San Diego até o Havaí (10 horas), foram transmitidos sinais de vídeo no formato digital (DVDs e videoconferência), descompactados, com taxas de 300 Mbps. Essas transmissões foram realizadas entre os navios, por meio de enlaces ópticos de até 17,5 km, sem comprometimento da qualidade e latência. Dessa forma, os ensaios mostraram que é possível estabelecer a comunicação *laser* entre plataformas marítimas durante uma operação naval, por meio da utilização de terminais FSO projetados

com um sistema ATP de alta resolução.

Além disso, para atender às demandas de comunicações do Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA (*USA Marines Corps*), o NRL vem desenvolvendo o projeto TALON (*Tactical Line-of-Sight Optical Network*) (RABINOVICH et al., 2015), com o objetivo de possibilitar o estabelecimento de redes táticas de comunicações ópticas, por linha de visada, nas operações conduzidas pelas tropas anfíbias norte-americanas. A Figura 1.5 mostra um terminal FSO usado no projeto TALON.



**Figura 1.5** – Terminal FSO do projeto TALON (RABINOVICH et al., 2015).

No ano de 2013, esses terminais foram testados em diversos ambientes operacionais. As medições realizadas mostraram uma capacidade de transmissão de 100 Mbps, com alta taxa de disponibilidade, entre os enlaces FSO de 16 km, estabelecidos na Baía de *Chesapeake* (RABINOVICH et al., 2015). No ano de 2018, novos testes de comunicações foram realizados, na região de Okinawa, no Japão. Sabe-se que essa posição geográfica é caracterizada por variações bruscas nas condições climáticas, principalmente quanto à umidade do ar, sendo, então, um ambiente propício para avaliar o desempenho dos transceptores (SPUTNIK, 2018). A Figura 1.6 mostra a instalação de um dos terminais do projeto TALON, sendo realizada por militares do Corpo de Fuzileiros dos EUA, em um mastro posicionado ao solo.

## 1.2 Contexto e Motivação

Sob a óptica de Julian Corbett, estrategista militar naval, “os homens vivem sobre a terra e não sobre o mar” (CORBBET; STAFFORD, 2004). Essa afirmação diz respeito à perene conexão entre a guerra no mar e em terra, que, muitas vezes, materializa-se com o desembarque de forças para combater no litoral (FERREIRA, 2014). Esse tipo de intervenção militar, também, conhecida como Operação Anfíbia (OpAnf) vem sendo realizada desde a Guerra do Peloponeso em 425 a.C. (RODRIGUES, 2011).



**Figura 1.6** – Instalação de terminal FSO em base terrestre em Okinawa (SPUTNIK, 2018).

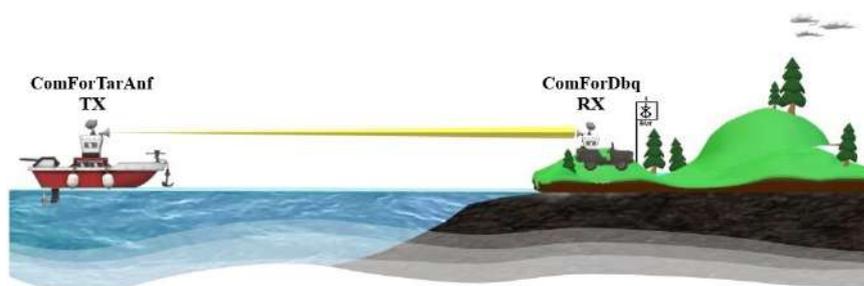
Contudo, foi durante a Segunda Guerra Mundial, nas águas do Oceano Pacífico, que as OpAnf atingiram seu ápice, consagrando-se como uma eficiente opção de emprego do Poder Naval contra um litoral fortemente defendido (FERREIRA, 2014). O período seguinte, pós-guerra, foi marcado pela corrida armamentista e pelas tensões entre os países dos blocos capitalista e socialista. No entanto, com o término da Guerra Fria e o desvanecimento das grandes ameaças e o surgimento de outras crises, de menor envergadura, o conceito de OpAnf foi flexibilizado (FERREIRA, 2014).

A fim de ajustar-se à nova ordem mundial instalada, as OpAnf deixaram de ser uma ferramenta exclusivamente de combate para ser também uma opção menos bélica, apta a levar soluções às crises que se desenvolviam em ambientes apenas potencialmente hostis, ou mesmo permissivos, projetando, assim, uma força que se apresentava não mais para combater, e sim para colaborar ou mediar conflitos (FERREIRA, 2014). É neste contexto que está inserida a Marinha do Brasil (MB), por meio da sua capacidade de realizar uma operação naval lançada do mar, por uma Força-Tarefa Anfíbia (ForTarAnf), sobre uma região litorânea hostil, potencialmente hostil ou mesmo permissiva, com o objetivo de introduzir uma Força de Desembarque (ForDbq) em terra, para cumprir missões designadas (MARINHA DO BRASIL, 2017).

As OpAnf são caracterizadas pela presença de um conjugado anfíbio, ou seja, um Grupamento Operativo de Fuzileiros Navais embarcado, dotado de capacidade de combate e apoio logístico, somado aos meios aeronavais, que viabilizarão o desembarque aéreo ou por superfície da tropa anfíbia (LEITE, 2014). Percebe-se, assim, que o combate em múltiplos domínios (marítimo, terrestre e aéreo) é uma característica intrínseca da guerra anfíbia. Por esse motivo, é vista por muitos especialistas, como uma das operações militares mais complexas, que exigem muita coordenação entre os meios envolvidos. Assim, para manter a ligação entre os Comandos da ForTarAnf e da ForDbq, durante uma OpAnf, a doutrina de comunicações da MB prevê a ativação da rede de radiocomunicação, conhecida como, Comando Naval Local (COMNALOC), estabelecida nas faixas de HF, VHF ou UHF.

Tendo em vista as vantagens das comunicações FSO, tais como segurança, largura de banda e capacidade de reconfigurabilidade, entende-se que essa tecnologia pode favorecer a MB em algumas modalidades de OpAnf. Assim, em situações catastróficas, que normalmente afetam a infraestrutura do local (totalmente ou parcialmente), os enlaces temporários FSO poderiam ser implantados prontamente em poucas horas. A eficiência do desdobramento dessa tecnologia, como sistema redundante de comunicações, foi testemunhada após os ataques terroristas de 11 de setembro na cidade de Nova York e exemplifica, adequadamente, a possibilidade de emprego dos sistemas FSO em situações caóticas. Naquela ocasião, enlaces FSO foram rapidamente estabelecidos, após a queda das torres gêmeas, a fim de operacionalizar as atividades do mercado financeiro (KHALIGHI; UYSAL, 2014).

Essas ou outras circunstâncias que envolvem o emprego limitado da força podem exigir a utilização de uma estrutura de comunicações rápida e flexível. Visualiza-se, assim, que a tecnologia FSO possa ser empregada nessas ocasiões, possibilitando o estabelecimento de um enlace de comunicações navio-terra, conforme ilustrado na Figura 1.7.



**Figura 1.7** – Enlace de comunicações ópticas no espaço livre para OpAnf.

No cenário citado, considera-se que um transceptor FSO (TX) encontra-se instalado em um suporte fixo à estrutura do casco de um navio fundeado, em uma posição próxima ao litoral. O outro terminal (RX) encontra-se totalmente fixo à estrutura de um mastro posicionado na praia, desprezando-se assim possíveis trepidações em sua base, provocadas pela ação dos ventos ou pela expansão térmica dos materiais do sistema de fixação. Essas mesmas considerações são aplicadas à outra extremidade do enlace. No entanto, o transceptor (TX) encontra-se sob a influência dos movimentos provocados pela interação do casco do navio com as ondas oceânicas. Essas ondas, por sua vez, antes de incidirem na praia, sofrem refração e, conseqüentemente, uma mudança na direção de propagação. Por esse motivo, suas cristas assumem uma posição paralela às linhas de batimetria.

No presente estudo, considera-se que a proa desse navio permanece, na média, apontada para a praia em uma posição perpendicular à faixa costeira durante todo o desenvolvimento da análise de desempenho.

## 1.3 Objetivo

Apesar da comprovação do êxito atingido em algumas implementações práticas de enlaces marítimos de comunicações FSO, percebe-se, ainda, que poucos estudos foram desenvolvidos, com o objetivo de descrever detalhadamente a modelagem matemática de um enlace FSO navio-terra.

Assim, entende-se que a resposta para este desafio envolva a compreensão dos principais fenômenos que regem os campos do eletromagnetismo e da mecânica clássica e, sobretudo, a capacidade de relacioná-los, para atingir a máxima eficiência do sistema.

Por esse motivo, esta dissertação tem por objetivo principal analisar o desempenho de um enlace marítimo de comunicações FSO, estabelecido entre um navio e o posto de Comando da ForDbq, em terra. Neste estudo, são consideradas as influências dos movimentos de translação e rotação do navio. Nessas análises foi considerado que os transceptores FSO emitem um feixe óptico circular, com distribuição Gaussiana de potência.

## 1.4 Organização da Dissertação

Para cumprir o objetivo proposto, esta dissertação está organizada da seguinte forma.

O capítulo 2 apresenta os conceitos hidrodinâmicos deste trabalho, ao abordar alguns princípios da teoria potencial linear no domínio da frequência. Apresenta também as características da plataforma marítima utilizada.

O Capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos dos enlaces FSO e da modelagem do canal utilizado. É apresentada, ainda, uma metodologia para o cálculo das perdas geométricas e por desalinhamento em um sistema FSO modelado com feixe Gaussiano.

O Capítulo 4 mostra, por meio dos resultados apresentados, como o desempenho do sistema FSO é impactado pelo fenômeno hidrodinâmico. Os resultados são apresentados para diferentes parâmetros de estado de mar e para alguns parâmetros do sistema FSO (ângulo de divergência e distância do enlace).

No capítulo 5, as conclusões resumem as principais características do comportamento dos sistemas FSO simulados diante do fenômeno hidrodinâmico e apresenta a eficácia do modelo proposto.

## 2 HIDRODINÂMICA DE SISTEMAS NAVAIS

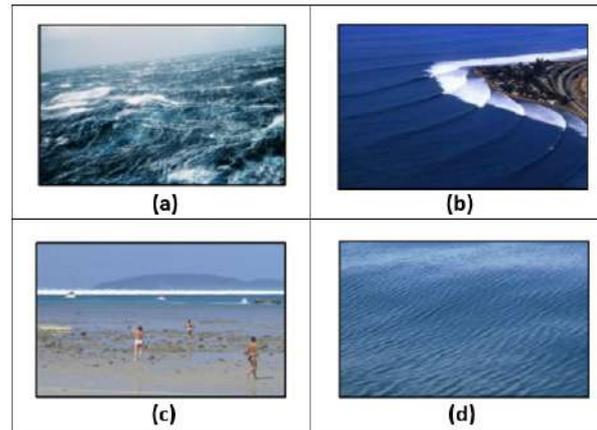
A hidrodinâmica é um ramo da mecânica dos fluidos que estuda a interação entre um corpo rígido e um fluido que escoar ao longo dessa estrutura (ÇENGEL; CIMBALA, 2018). Essa análise é inicialmente desenvolvida com o objetivo de avaliar o carregamento hidrodinâmico em um navio, ou seja, as pressões, forças e momentos induzidos no casco por ondas oceânicas (JOURNÉE; MASSIE, 2001). Posteriormente, são aplicados os princípios da dinâmica de corpos rígidos, com o intuito de analisar a influência dos movimentos do navio e suas respostas em ondas (CASTILLO, 2009). Essa avaliação, conhecida como análise *seakeeping*, está diretamente associada à intensidade dos movimentos e às acelerações em diferentes pontos do casco da embarcação, quando essa encontra-se sob a influência de diferentes estados de mar (MORENO, 2010). Visa, portanto, assegurar o desempenho operacional do navio e o conforto da tripulação, sendo uma etapa fundamental do projeto do sistema flutuante (FALTISEN, 1990). Por esse motivo, é apresentada, neste capítulo, a fundamentação teórica necessária para compreensão do fenômeno hidrodinâmico e sua influência no desempenho do subsistema óptico.

### 2.1 Ondas Oceânicas

Neste estudo, sem perda de generalidade, considera-se que o navio encontra-se fundeado na baía de Campos-RJ em uma posição próxima à uma Praia de Desembarque (PraDbq). Nesse sentido, entende-se que essa plataforma marítima é influenciada pelas ondas oceânicas dessa região, que podem surgir basicamente em função das perturbações no fluido, causadas pelas forças ou pressões naturais, provenientes da atmosfera (ventos), dos terremotos, dos corpos celestiais (Sol e Lua), da gravitação terrestre e da força Coriolis (rotação da Terra) (WMO, 1998). Porém, é o vento, que sopra sobre a superfície oceânica, o principal agente causador das ondas que influenciam nos movimentos do navio (JOURNÉE; MASSIE, 2001). Devido à influência da força gravitacional, essas ondas são também conhecidas como ondas de gravidade (WMO, 1998).

#### 2.1.1 Características Gerais das Ondas Oceânicas

As ondas oceânicas possuem características aleatórias quanto ao seu formato, comprimento e velocidade de propagação (WMO, 1998). Algumas dessas características podem ser observadas na Figura 2.1 (JOURNÉE; MASSIE, 2001) e nas descrições apresentadas abaixo da mesma.



**Figura 2.1** – Ondas oceânicas: (a) *wind seas*; (b) *swell*; (c) *tsunami*; e (d) de capilaridade.

- (a) *Wind seas*: ocorrem com menor frequência e são geradas pelo vento local e em geral não possuem uma direção coerente e formato definido;
- (b) *Swell*: ocorrem com maior frequência e se propagam por milhares de quilômetros, mantendo um alinhamento e um agrupamento em série;
- (c) *Tsunami*: surgem em função de perturbações sísmicas (terremotos e erupções vulcânicas) e não oferecem perigo em alto mar; e
- (d) De capilaridade: formadas no início das correntes de ventos e enfraquecem quando o vento termina, sendo amortecidas pela tensão superficial.

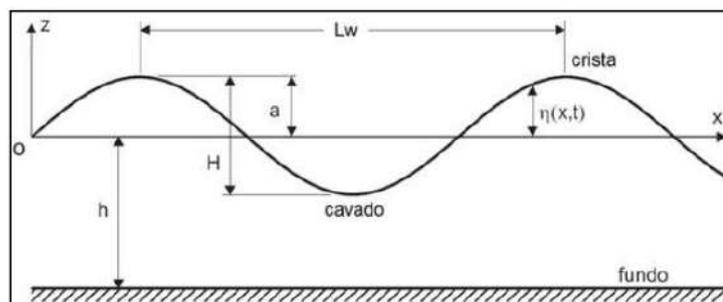
### 2.1.2 Classificação das Ondas

As ondas oceânicas podem receber duas classificações quanto à regularidade (JOURNÉE; MASSIE, 2001). Podem ser do tipo regular, sendo, então, periódicas no tempo e no espaço, e são caracterizadas por parâmetros determinísticos, tais como período ( $T$ ), altura ( $H$ ) e, profundidade ( $h$ ). Quando apresentam um comportamento aleatório em função do tempo e do espaço, são classificadas como irregulares e são caracterizadas por parâmetros estatísticos e/ou espectrais.

Recebem, também, duas classificações quanto à linearidade. A primeira considera que as ondas são descritas pela teoria potencial linear formulada por Airy (FALTISEN, 1990). Quando as ondas não satisfazem às premissas básicas dessa teoria, elas são consideradas como não lineares e são descritas por modelos analíticos ou numéricos (WMO, 1998).

### 2.1.3 Características Físicas das Ondas

A Figura 2.2 apresenta as principais características físicas das ondas.



**Figura 2.2** – Características físicas das ondas oceânicas (MUNOZ, 2011)

- Altura da onda ( $H$ ): é a distância vertical do cavado até a crista;
- Comprimento da onda ( $L_w$ ): é a distância entre duas cristas sucessivas;
- Altura relativa ( $H_r$ ): é a proporção entre a altura da onda e a profundidade ( $H/h$ ); e
- Declividade ( $D_w$ ): é a relação entre a altura de onda e o seu comprimento ( $D_w = H/L_w$ ).

#### 2.1.4 Caracterização do Estado de Mar

Como mencionado anteriormente, o modelo hidrodinâmico recebe como parâmetros de entrada algumas variáveis que descrevem o comportamento do mar na posição de fundeio do navio. Nessa descrição, utiliza-se, normalmente, parâmetros estatísticos, tais como a altura significativa ( $H_s$ ), o período médio ( $T_m$ ), o período de pico ( $T_p$ ) e os espectros de distribuição de energia em componentes de frequências (WMO, 1998; CHANDRASEKARAN, 2018).

O levantamento desses dados estatísticos é normalmente feito por meio de sensores de medição instalados em boias meteoceanográficas (WMO, 1998) lançadas ao mar (vide Figura 2.3). O ondógrafo direcional, do tipo boia de superfície, fabricado pela empresa Datawell (*datawell directional waverider*) é utilizado, por exemplo, para registrar as elevações direções e períodos das ondas oceânicas (DATAWELL, 2021). Assim, após o processo de coleta de dados, essas informações são transmitidas, por meio de um enlace rádio ou de satélite (WMO, 1998), para serem processadas e compiladas em séries temporais.

Posteriormente, utiliza-se um processo de filtragem de sinal para eliminar o ruído presente nessas séries temporais. Em seguida, esses sinais, que representam as elevações de onda no domínio do tempo, são convertidos em uma modalidade de energia associada à frequência, obtendo-se, assim, um espectro do mar (WMO, 1998). Na etapa final desse processo, busca-se uma aproximação entre o espectro do mar e uma função de distribuição de probabilidade conhecida (FALTISEN, 1990).



**Figura 2.3** – Boia meteoceanográfica (OSTROWSKI; STELLA, 2016).

A Tabela 2.1 mostra alguns resultados de um levantamento estatístico. É utilizada como exemplo para a introdução de alguns parâmetros do subsistema hidrodinâmico.

**Tabela 2.1** – Estatísticas de Ondas (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

| Intervalo de Altura das Ondas (m) | $H_m$ (m) | $N$ | $f(x)$ | $F(x)$ |
|-----------------------------------|-----------|-----|--------|--------|
| 0,25 - 0,75                       | 0,5       | 15  | 0,100  | 0,100  |
| 0,75 - 1,25                       | 1,0       | 30  | 0,200  | 0,300  |
| 1,25 - 1,75                       | 1,5       | 55  | 0,367  | 0,667  |
| 1,75 - 2,25                       | 2,0       | 21  | 0,140  | 0,807  |
| 2,25 - 2,75                       | 2,5       | 14  | 0,093  | 0,900  |
| 2,75 - 3,25                       | 3,0       | 9   | 0,060  | 0,960  |
| 3,25 - 3,75                       | 3,5       | 5   | 0,033  | 0,993  |
| 3,75 - 4,25                       | 4,0       | 1   | 0,007  | 1,000  |
| Total                             | -         | 150 | 1,000  | -      |

Na Tabela 2.1,  $H_m$  representa a média das alturas das ondas,  $N$  é número de registros de ondas,  $f(x)$  é a frequência de ocorrência de um intervalo de alturas de ondas e  $F(x)$  é a frequência acumulativa. Com base nos dados dessa tabela, é apresentada a definição do primeiro parâmetro de entrada do subsistema hidrodinâmico.

A altura significativa de onda ( $H_s$ ) representa a média de 1/3 das alturas de ondas mais altas de um registro de ocorrências de um estado de mar (BAI; JIN, 2016). Assim, aplicando esse conceito aos dados da Tabela 2.1, tem-se que:

$$H_s = (2,0 \cdot 21 + 2,5 \cdot 14 + 3,0 \cdot 9 + 3,5 \cdot 5 + 4,0 \cdot 1) \div 50 = 2,51 \text{ m.}$$

O segundo parâmetro é o período de pico ( $T_p$ ), que é o período onde ocorre a máxima intensidade de energia em um espectro de ondas do mar (JOURNÉE; MASSIE, 2001). A Figura 2.4 ilustra a definição de altura significativa da onda. Já a Figura 2.5 mostra a ocorrência de um período de pico em uma representação espectral.

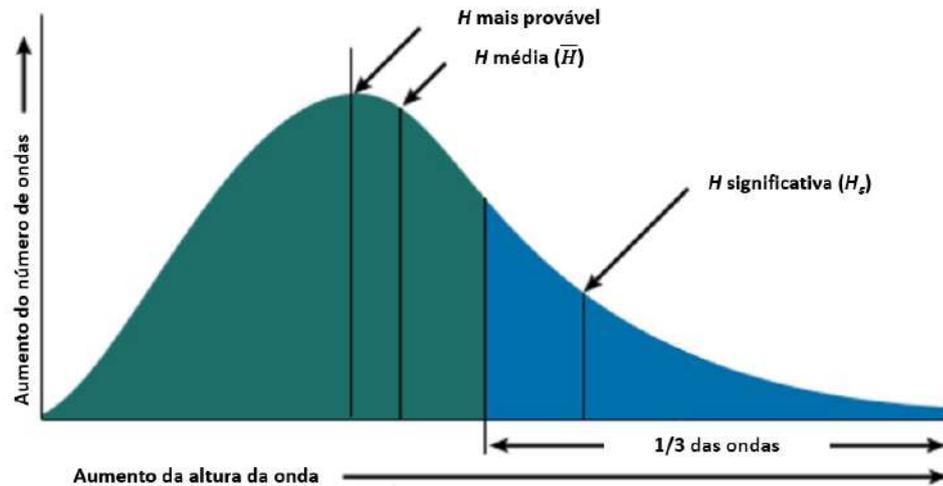


Figura 2.4 – Definição da altura significativa da onda (COLLINS, 2014).

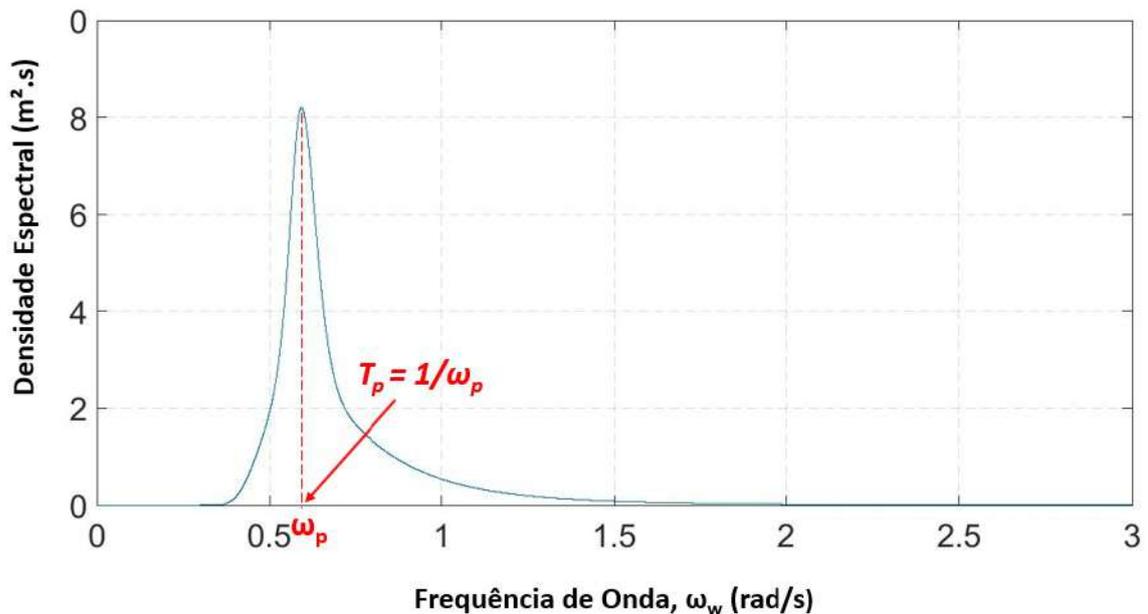


Figura 2.5 – Definição do período de pico da onda (GURGEL et al., 2020).

O último parâmetro é o ângulo de incidência de ondas ( $\chi$ ), apresentado na próxima seção. Neste trabalho, o estado do mar será caracterizado pelos valores assumidos pelos parâmetros ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\chi$ ).

Com base no conhecimento dos parâmetros  $H_s$  e  $T_p$  pode-se avaliar, por meio do diagrama de dispersão da Tabela 2.2, a probabilidade de ocorrência de um determinado estado do mar em uma região oceânica específica. Esse diagrama relaciona o número de ocorrências dos pares ( $H_s$ ,  $T_p$ ) ao número total de estados de mar medidos durante um período de tempo relativamente longo na região geográfica de interesse (Figura 2.6).

A Tabela 2.2 apresenta o diagrama de dispersão anual na área 11-32 (litoral sudeste do Brasil), da Figura 2.6, baseado nas médias das previsões de tempo realizadas pelo *National Maritime Research Institute* durante um período de 10 anos (NMRI, 2006).

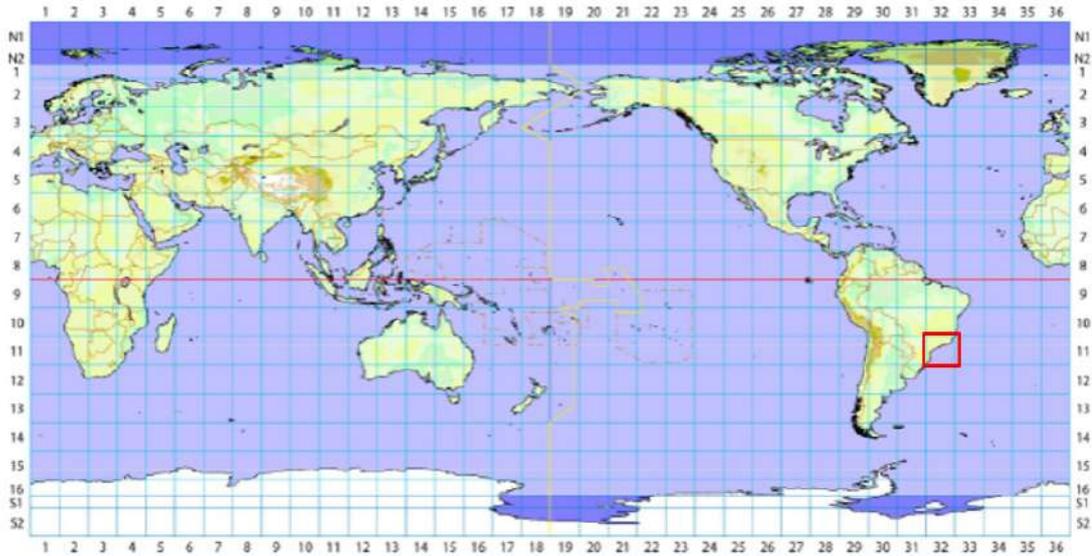


Figura 2.6 – Região geográfica de interesse (NMRI, 2006).

Tabela 2.2 – Diagrama de Dispersão de Mar (NMRI, 2006).

| $H_s$ (m) | $T_p$ (s) |           |           |            |             |             |             | TOTAL   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|---------|
|           | 2,0 - 4,0 | 4,0 - 6,0 | 6,0 - 8,0 | 8,0 - 10,0 | 10,0 - 12,0 | 12,0 - 14,0 | 14,0 - 16,0 |         |
| 7,5 - 8,0 |           |           |           |            | 0,00034     |             |             | 0,00034 |
| 7,0 - 7,5 |           |           |           |            | 0,00159     | 0,00007     |             | 0,00166 |
| 6,5 - 7,0 |           |           |           |            | 0,00166     | 0,00112     |             | 0,00278 |
| 6,0 - 6,5 |           |           |           | 0,00224    | 0,00621     | 0,00790     |             | 0,01635 |
| 5,5 - 6,0 |           |           |           | 0,01194    | 0,01387     | 0,02367     | 0,00027     | 0,04975 |
| 5,0 - 5,5 |           |           | 0,00024   | 0,03815    | 0,03812     | 0,05796     | 0,00217     | 0,13664 |
| 4,5 - 5,0 |           |           | 0,00465   | 0,08608    | 0,12399     | 0,10307     | 0,00648     | 0,32427 |
| 4,0 - 4,5 |           |           | 0,04158   | 0,23330    | 0,27094     | 0,19877     | 0,02486     | 0,76945 |
| 3,5 - 4,0 |           |           | 0,27556   | 0,43631    | 0,53609     | 0,41854     | 0,07214     | 1,73864 |
| 3,0 - 3,5 |           | 0,00020   | 1,08320   | 0,99051    | 1,06234     | 0,87540     | 0,12755     | 4,13920 |
| 2,5 - 3,0 |           | 0,01648   | 3,26143   | 2,21920    | 2,22171     | 1,74653     | 0,17707     | 9,64242 |
| 2,0 - 2,5 |           | 0,12999   | 6,51361   | 4,64552    | 4,86349     | 2,43795     | 0,14529     | 18,7359 |
| 1,5 - 2,0 | 0,00070   | 0,86601   | 9,01983   | 9,94359    | 6,97481     | 2,59206     | 0,10520     | 29,5022 |
| 1,0 - 1,5 | 0,00020   | 0,95463   | 7,32552   | 12,2426    | 5,35464     | 1,63160     | 0,06451     | 27,5737 |
| 0,5 - 1,0 | 0,00265   | 0,17910   | 2,10694   | 2,77194    | 0,97437     | 0,30666     | 0,00672     | 6,34838 |
| 0,0 - 0,5 | 0,86421   | 0,01184   | 0,04077   | 0,05738    | 0,03415     | 0,01038     | 0,00027     | 1,01900 |
| TOTAL     | 0,86776   | 2,15825   | 29,6733   | 33,67876   | 22,4783     | 10,4117     | 0,73253     | 100,000 |

Os valores representados na primeira coluna à esquerda do diagrama de dispersão ( $H_s$ ) são intervalos de classe das alturas significativas de mar. Similarmente, os valores representados na primeira linha desse diagrama ( $T_p$ ) representam os intervalos de classe dos períodos de pico de mar.

Dessa forma, os valores representativos desses intervalos de classe ( $H_{s_{rp}}, T_{p_{rp}}$ ) foram utilizados como parâmetros de entrada na formulação matemática, que descreve o comportamento do mar na posição de fundeio do navio.

### 2.1.5 Espectro de Mar

O espectro de mar é um modelo matemático que representa estatisticamente a superfície aleatória do mar (ZUBALY, 2015). Foi com o propósito de determinar as características do mar do Norte, que a Inglaterra, a Holanda, os Estados Unidos e a Alemanha desenvolveram, entre os anos de 1968 e 1969, um empreendimento cooperativo, conhecido como (*Joint North Sea Wave Project - JONSWAP*) (HASSELMANN et al., 1973). Naquela época, alguns cientistas desses países realizaram diversas medições na região do mar do Norte, quase continuamente, durante várias semanas, para obter uma amostragem apropriada da frequência, direção de propagação e outras características das ondas oceânicas. Obtiveram, assim, ao término desse projeto, uma formulação matemática definida pela seguinte expressão (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$S_j(\omega) = A_\gamma \cdot S_{PM} \cdot \gamma \cdot e^{\left[-0,5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right]}. \quad (2.1)$$

Nessa formulação espectral,  $A_\gamma$  é um fator de normalização,  $S_{PM}$  é o espectro de Pierson-Moskowitz e o  $\gamma$  é o fator de picosidade. Para sistemas flutuantes que operam na Bacia de Campos-RJ, este fator assume o valor típico igual a 3,3 (PINHO et al., 2004). Os demais parâmetros são calculados pelas expressões (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$A_\gamma = 1 - 0,287 \ln(\gamma), \quad (2.2)$$

$$S_{PM} = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \cdot \frac{\omega_p^4}{\omega^5} \cdot e^{\left[-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right]}, \quad (2.3)$$

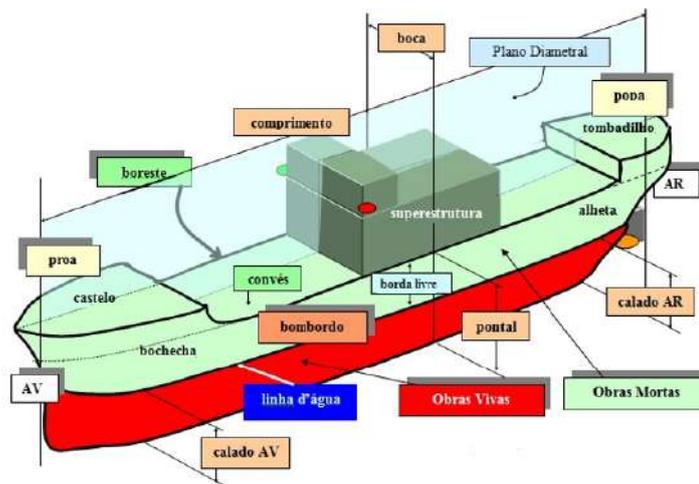
onde  $\omega$  é a frequência das ondas oceânicas,  $\omega_p$  e  $H_s$  são a frequência de pico e a altura significativa das ondas oceânicas, respectivamente. Se  $\omega \leq \omega_p$ , então,  $\sigma = 0,07$  e se  $\omega > \omega_p$ ,  $\sigma = 0,09$ , sendo  $\omega_p = 2\pi/T_p$ . O espectro de JONSWAP é bastante representativo e utilizado no mar do Norte, porém é também a formulação mais utilizada para os estudos referentes à Bacia de Campos-RJ (MUNOZ, 2011; RONCETTI et al., 2015; JACOB et al., 2012). Por esse motivo, neste trabalho será utilizada essa formulação espectral para representar o comportamento do mar na região de operação do navio.

## 2.2 Casco do Navio

Uma embarcação é um dos meios de locomoção mais antigos desenvolvidos pelo homem (MARINHA DO BRASIL, 2021). Ela é utilizada para o transporte aquaviário de pessoas e materiais. O termo navio é normalmente utilizado para designar embarcações de grande porte. Já o termo embarcação, na Marinha do Brasil, refere-se às embarcações

pequenas transportáveis a bordo dos navios e aquelas empregadas pelos estabelecimentos navais ou particulares, para seus serviços de porto (FONSECA, 2002).

O termo casco é utilizado na construção naval para caracterizar o corpo de um navio sem a mastreação, os equipamentos e os acessórios. Sua geometria é moldada em uma estrutura normalmente constituída por ligas metálicas, madeira, concreto, ou uma combinação desses materiais (FONSECA, 2002). A Figura 2.7 ilustra as partes principais do casco de um navio e apresenta a definição de alguns dos principais termos utilizados no texto desta dissertação.



**Figura 2.7** – Definição das partes do casco de um navio (LINO, 2010).

O navio usado no presente estudo é o *USNS American Mariner*. Esse navio foi comissionado pelas Forças Armadas dos Estados Unidos e suas principais características (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975) estão resumidas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Características Principais do Navio *Mariner*.

| Parâmetro | Descrição         | Valor   |
|-----------|-------------------|---------|
| $L_s$     | Comprimento total | 160,9 m |
| $B_s$     | Boca              | 23,1 m  |
| $C_s$     | Calado            | 9,068 m |

Esse navio recebeu inicialmente o nome de *SS George Calvert* na ocasião em que foi incorporado à Guarda Costeira norte-americana, no ano de 1941. Em 1942, recebeu uma nova designação, *TS American Mariner*, e passou a ser utilizado como navio de apoio à instrução dos cadetes da Academia Marítima de Massachusetts. Posteriormente, no ano de 1961, foi convertido em um navio de detecção de mísseis (*Missile Range Instrumentation*) e recebeu o nome de *US Army Ship American Mariner*, quando passou a ser comissionado pelo Exército dos EUA, em apoio à Agência de Pesquisa Avançada em Mísseis Guiados (YARNALL, 2019). A Figura 2.8 mostra alguns detalhes dos sistemas de detecção de

mísseis instalados a bordo do *Mariner*. Nesse comissionamento, foi empregado como navio de detecção de mísseis até o ano de 1964 quando foi transferido para a Marinha Norte-Americana. Nesse processo de transferência, recebeu a designação, *USNS American Mariner* (T-AGM-12) e permaneceu em operação por mais dois anos (YARNALL, 2019). A Figura 2.9 apresenta outros detalhes deste navio.



**Figura 2.8** – US Army Ship American Mariner (YARNALL, 2019)



**Figura 2.9** – USNS American Mariner (T-AGM-12) (YARNALL, 2019)

Neste trabalho, o sistema FSO foi simulado, como se estivesse instalado a bordo dessa plataforma marítima. Optou-se pela utilização desse navio por conta de suas características militares e pela facilidade de acesso às informações relacionadas à geometria do casco. Os parâmetros que descrevem o formato do casco foram extraídos do manual de instruções do *software* HANSEL (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975). Essa ferramenta computacional foi utilizada neste estudo, durante o desenvolvimento da análise *seakeeping* do modelo hidrodinâmico. Os detalhes relacionados ao emprego dessa ferramenta são apresentados no Apêndice A.

Em função da indisponibilidade de informações relacionadas ao pontal do navio, fez-se uma estimativa desse parâmetro com base em valores típicos de navios militares. Percebeu-se, por exemplo, baseando-se nas dimensões do navio militar norueguês, da Figura 2.10, que a relação entre o pontal e o calado é dada por  $P_s = 2C_s$ . Para o navio *Mariner*, tem-se que,  $P_s = 2(9,068) = 18,136$  m.

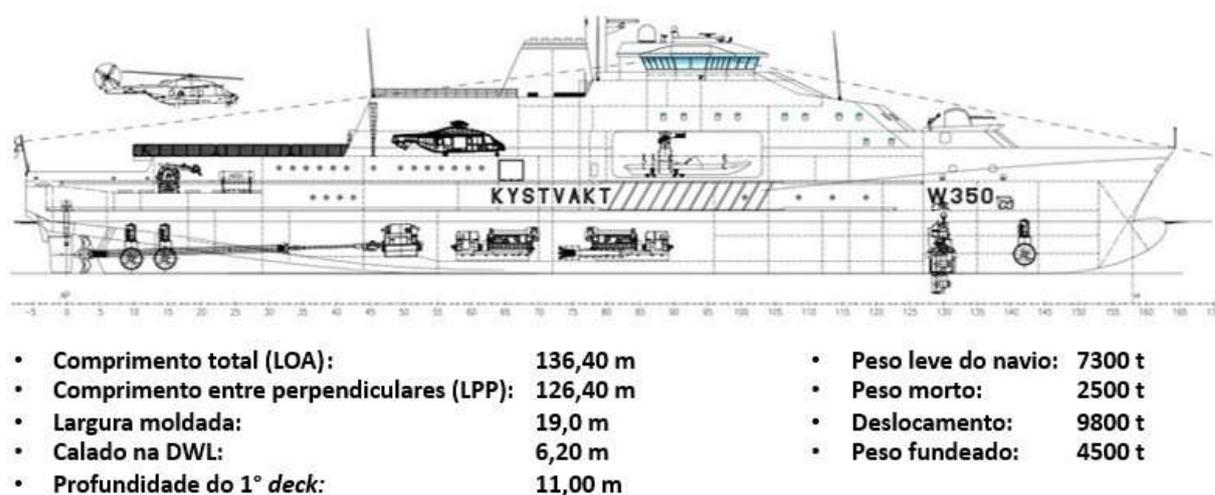


Figura 2.10 – Navio militar norueguês.

Assim, estima-se que o convés principal do *Mariner* esteja à 9,068m acima da linha d'água do navio, *LWL* (*Load Water Line*). Nesse sentido, é possível que as antenas parabólicas do *Mariner* (AN/FPQ-4 C-BAND RADAR), ilustradas na Figura 2.11, estejam posicionadas a aproximadamente 9 m acima do convés principal.

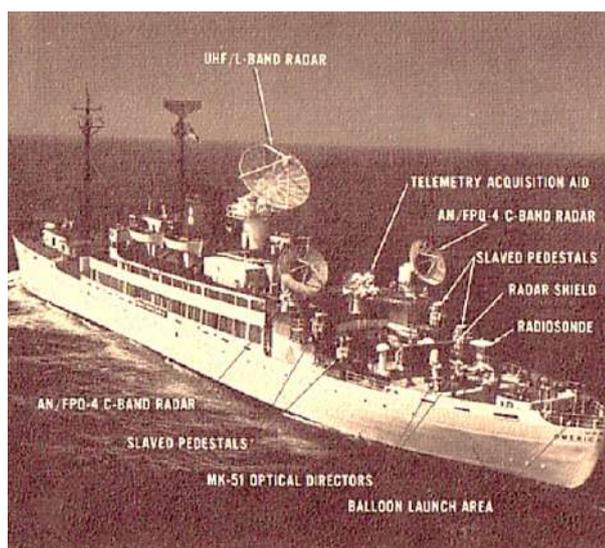


Figura 2.11 – Antenas do navio *Mariner* (YARNALL, 2019).

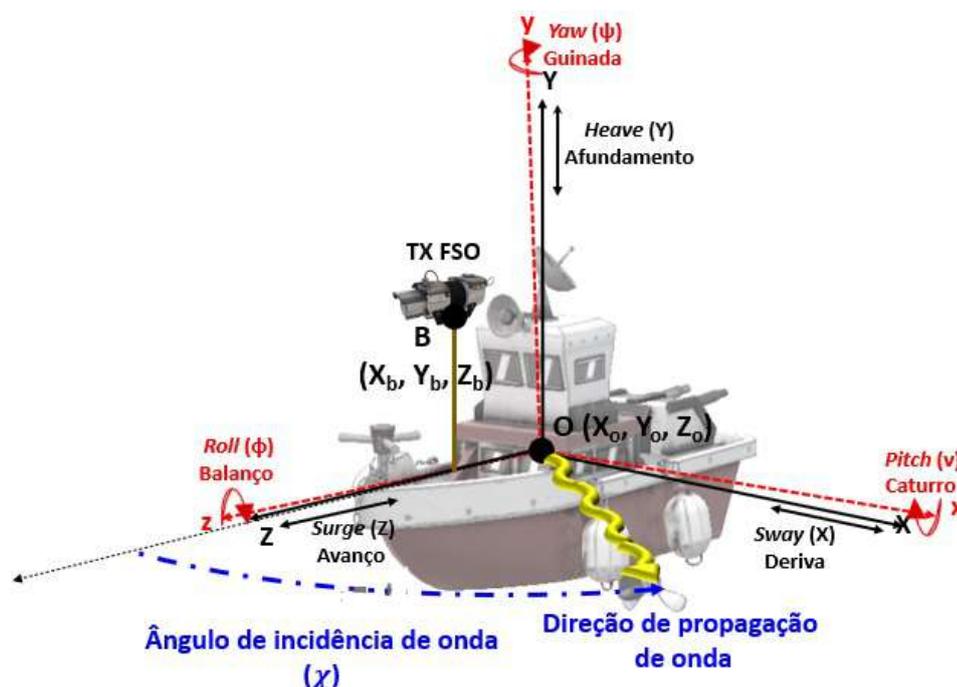
Com base nessa análise, o sistema FSO foi simulado, considerando o TX FSO posicionado no ponto *B* do casco do navio. Esse ponto estaria próximo às antenas de

radar AN/FPQ, da Figura 2.11, ou seja, à 11 m de altura em relação ao nível do convés principal.

Essa posição foi definida com base nas características de apontamento das antenas de telemetria do navio. Por esse motivo, as análises de desempenho do sistema FSO foram realizadas, com base no cenário ilustrado na Figura 1.7, ou seja, a proa do navio voltada para a praia.

### 2.2.1 Movimentos do Navio

As ondas oceânicas, quando incidem no casco do navio, fazem com que a embarcação desenvolva movimentos em seis graus de liberdade. Os movimentos translacionais do navio na direção dos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são denominados deriva (*sway*), afundamento (*heave*) e avanço (*surge*), respectivamente; enquanto os movimentos de rotação em relação aos eixos do corpo  $x$ ,  $y$ ,  $z$  são definidos como caturro (*pitch*), guinada (*yaw*) e balanço (*roll*), de forma correspondente, conforme Figura 2.12.



**Figura 2.12** – Definição dos movimentos do navio e do ângulo de incidência de ondas.

Os movimentos mostrados na Figura 2.12 estão consolidados na Tabela 2.4.

Cabe ressaltar que os eixos de referências apresentados na Figura 2.12 seguem a definição normalmente encontrada na literatura da área de eletromagnetismo.

Tabela 2.4 – Movimentos do Navio.

| Movimento    | Índice | Descrição                             | Posição |
|--------------|--------|---------------------------------------|---------|
| <i>Sway</i>  | 1      | Translação lateral                    | $x$     |
| <i>Heave</i> | 2      | Translação vertical                   | $y$     |
| <i>Surge</i> | 3      | Translação longitudinal               | $z$     |
| <i>Pitch</i> | 5      | Rotação em torno do eixo transversal  | $v$     |
| <i>Yaw</i>   | 4      | Rotação em torno do eixo vertical     | $\psi$  |
| <i>Roll</i>  | 6      | Rotação em torno do eixo longitudinal | $\phi$  |

## 2.3 Ângulo de Incidência de Onda

O ângulo de incidência de onda  $\chi$ , ilustrado na Figura 2.12, é outro parâmetro importante utilizado para definir o comportamento do navio em ondas. Ele caracteriza a direção principal de propagação das ondas e o seu valor é igual ao ângulo de abertura mensurado no sentido anti-horário a partir do rumo do navio. Desse modo, para mar de popa,  $\chi = 0^\circ$  e para mar de proa,  $\chi = 180^\circ$  (CASTILLO, 2009).

Neste trabalho, foi considerada a influência dos principais ângulos de incidências de ondas que incidem no casco da embarcação, ou seja,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$ .

## 2.4 Sistemas de Referências

Normalmente, no estudo clássico do comportamento do navio no mar, assume-se que o corpo flutuante desenvolve movimentos lineares e harmônicos em torno de um ponto. A posição média desses movimentos é normalmente adotada como origem de um sistema de referência inercial (SALVESEN; TUCK; FALTINSEN, 1970). Para as situações em que o navio encontra-se fundeado, ou seja, velocidade de avanço nula ( $U_s = 0$ ), esse sistema inercial é fixo no espaço, mas coincide com a posição média do deslocamento do navio (CASTILLO, 2009). Dessa forma, o ponto  $O (X_o, Y_o, Z_o)$  na Figura 2.13 representa a origem do sistema inercial adotado neste trabalho. Esse sistema inercial não oscila com o navio e é utilizado nas medições dos movimentos do sistema flutuante (CASTILLO, 2009).

No *Mariner*, a origem desse sistema de referências é definida no manual do programa HANSEL (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975) e se encontra localizada na interseção do plano diametral do navio com o plano de linha de água, na mesma vertical do centro de gravidade (CG). No caso do *Mariner*, o CG se encontra a uma distância de 83,39 m a ré da perpendicular de vante do navio (F.P.) e, a 0,905 m abaixo da linha de água (*LWL*), conforme ilustrado na Figura 2.14.

Além do referencial no ponto  $O$ , o manual do HANSEL define, também, um sistema

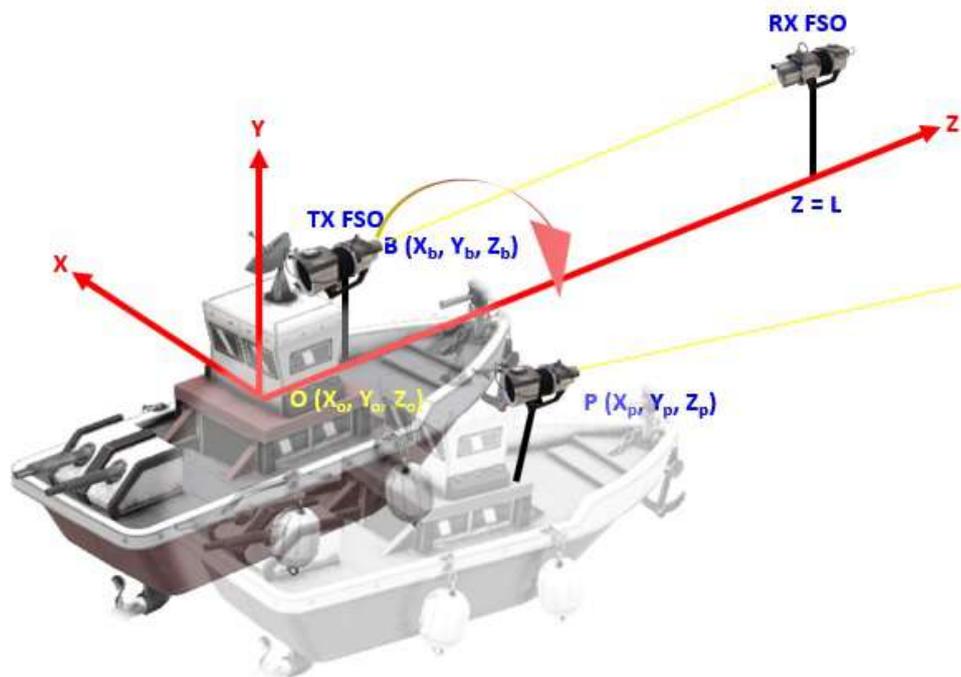


Figura 2.13 – Definição do sistema de referências do modelo hidrodinâmico.

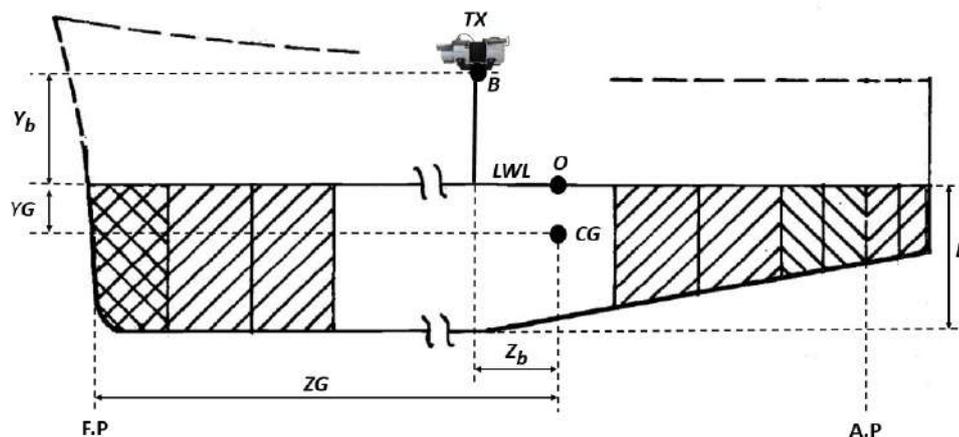


Figura 2.14 – Definição do sistema de referências do ponto  $O$  (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975).

de referências fixo ao navio, que oscila com o flutuante. É com base nesses eixos de referências, que são definidas as coordenadas das seções transversais do casco do navio (tabela de cotas).

As análises de desempenho foram feitas, considerando o TX FSO posicionado no ponto B, cujas coordenadas são  $(X_b = 0 \text{ m}, Y_b = 20 \text{ m}, Z_b = 10 \text{ m})$ .

## 2.5 Frequência de Encontro

A frequência de encontro  $\omega_e$  é definida como a frequência, com a qual o navio encontra as ondas de frequência  $\omega_w$ . No caso de ondas profundas, a frequência de encontro

é dada por (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$\omega_e = \omega_w - \frac{U_s}{g} \omega_w^2 \cos(\chi), \quad (2.4)$$

onde  $U_s$  é a velocidade de deslocamento do navio e  $g$  é a aceleração da gravidade. No modelo proposto, o navio encontra-se fundeado, logo  $U_s = 0$  e  $\omega_e = \omega_w$ .

## 2.6 Superposição de Movimentos

Para calcular os movimentos em qualquer ponto do casco do navio, é necessário realizar uma transformação dos eixos coordenados. Nesse sentido, considera-se que os movimentos do navio ao longo e em torno dos eixos de um sistema de referência XYZ possuem a seguinte descrição matemática (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$x = x_a \cos(\omega_e t + \epsilon_{x\zeta}), \quad (2.5)$$

$$y = y_a \cos(\omega_e t + \epsilon_{y\zeta}), \quad (2.6)$$

$$z = z_a \cos(\omega_e t + \epsilon_{z\zeta}), \quad (2.7)$$

$$v = v_a \cos(\omega_e t + \epsilon_{v\zeta}), \quad (2.8)$$

$$\psi = \psi_a \cos(\omega_e t + \epsilon_{\psi\zeta}), \quad (2.9)$$

$$\phi = \phi_a \cos(\omega_e t + \epsilon_{\phi\zeta}), \quad (2.10)$$

onde  $x_a$ ,  $y_a$ ,  $z_a$ ,  $v_a$ ,  $\psi_a$  e  $\phi_a$  são as amplitudes dos movimentos do navio no ponto  $O$ ,  $\epsilon_{x\zeta}$ ,  $\epsilon_{y\zeta}$ ,  $\epsilon_{z\zeta}$ ,  $\epsilon_{v\zeta}$ ,  $\epsilon_{\psi\zeta}$  e  $\epsilon_{\phi\zeta}$  representam a diferença de fase entre determinado movimento do navio e a onda de entrada.

Conhecendo os movimentos do navio correspondentes à origem  $O$ , é possível calcular os movimentos absolutos em qualquer outro ponto do casco do navio, utilizando as seguintes equações de superposição de movimentos (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$x_p = x + Z_b \psi - Y_b \phi, \quad (2.11)$$

$$y_p = y - Z_b v + X_b \phi, \quad (2.12)$$

$$z_p = z - X_b\psi + Y_bv, \quad (2.13)$$

onde  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $v$ ,  $\phi$ ,  $\psi$  são as funções harmônicas dos movimentos do navio (Eq. 2.7 - Eq. 2.9) cujas amplitudes correspondem aos valores de RAO calculados no ponto  $O$ .

Utilizando a Eq. 2.12 é possível, por exemplo, calcular o movimento vertical ( $y_p$ ) em um ponto  $B(X_b, Y_b, Z_b)$  do corpo flutuante, considerando as contribuições dos movimentos de *pitch*, *roll* e *heave*. Realizando as substituições, a expressão desse movimento pode ser reescrita da seguinte forma (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$y_p = h(\omega_e, t) = y_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{y\zeta}) - Z_b v_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{v\zeta}) + X_b \phi_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\phi\zeta}). \quad (2.14)$$

Tendo em vista que este movimento é composto pela superposição linear de três movimentos harmônicos, o movimento resultante ( $y_p$ ) será, também, do tipo harmônico, expresso pela seguinte equação (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$h(\omega_e, t) = h_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{h\zeta}) = h_a \cos(\varepsilon_{h\zeta}) h_a \cos(\omega_e t) - h_a \sin(\varepsilon_{h\zeta}) \sin(\omega_e t), \quad (2.15)$$

onde  $h_a$  é a amplitude e  $\varepsilon_{h\zeta}$  é o ângulo de fase do movimento harmônico composto, expressos pelas seguintes equações (JOURNÉE; MASSIE, 2001):

$$h_a = \sqrt{h_a \cos(\varepsilon_{h\zeta})^2 + h_a \sin(\varepsilon_{h\zeta})^2}, \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{h\zeta} = \arctan \left\{ \frac{h_a \sin(\varepsilon_{h\zeta})}{h_a \cos(\varepsilon_{h\zeta})} \right\}. \quad (2.17)$$

## 2.7 Comportamento no Mar

O comportamento no mar é o estudo das diversas características dos movimentos complexos, desenvolvidos por um navio ou sistema oceânico, em decorrência das influências do mar irregular. Esses movimentos podem ser avaliados de três maneiras (ZUBALY, 2015):

- Teoria hidrodinâmica;
- Ensaio de modelos, em escala reduzida, em tanques de ondas; e
- Medições dos movimentos do navio, em escala real, no mar.

No presente trabalho, foi utilizado o programa HANSEL para a análise do comportamento no mar. Essa ferramenta computacional calcula os parâmetros hidrodinâmicos do navio, com base na teoria potencial linear no domínio da frequência (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975). Ao utilizar esse software, assume-se algumas considerações relacionadas a esse princípio. Considera-se, por exemplo, que as ondas oceânicas são de pequena amplitude e declividade. Considera-se, também que o navio desenvolve pequenos movimentos em um escoamento irrotacional e invíscido.

Para realizar o ensaio hidrodinâmico do modelo em escala reduzida, utiliza-se, normalmente, um tanque oceânico como mostrado na Figura 2.15.



**Figura 2.15** – Tanque oceânico (COPPE/UFRJ, 2021).

O tanque mostrado na Figura 2.15 pertence à infraestrutura do Laboratório de Tecnologia Oceânica (Laboceano) da COPPE/UFRJ. Durante alguns ensaios, o modelo do navio é conectado a um sistema simplificado de ancoragem horizontal, composto por linhas e molas em série, fixo às paredes do tanque por meio de um sistema de molas. Esse sistema de amarração tem como objetivo evitar que o navio derive excessivamente, porém, sem interferir nos movimentos oscilatórios associados às frequências de excitação linear de onda. Assim, para cada frequência emitida pelo gerador, em uma determinada direção, os valores das amplitudes de resposta do corpo flutuante são mensurados pelos instrumentos instalados no modelo. Em seguida, por meio de circuitos de processamento de sinais, as amplitudes de repostas são armazenadas em um banco de dados. Assim, é possível obter os valores do Operador de Amplitude de Resposta (RAO), por meio da seguinte expressão (ZUBALY, 2015):

$$RAO = \frac{\textit{Amplitude de Resposta de Movimento}}{\textit{Amplitude da Onda Incidente}} \quad (2.18)$$

RAO é uma função de transferência das amplitudes de movimento de um sistema flutuante. Os valores de RAO estão associados à geometria submersa do casco e à condição de carregamento do navio (calado e distribuição de pesos a bordo) e representam as respostas do flutuante nos seis graus liberdade, diante das incidências e frequências de ondas regulares (ZUBALY, 2015). Assim, supondo a realização de um ensaio de um

modelo hidrodinâmico, no tanque da Figura 2.15, vamos considerar diversas frequências de ondas regulares. Inicialmente, por exemplo, para a frequência de onda  $\omega_e = 1$  rad/s da Tabela 2.5, são obtidos os valores de RAO, para cada grau de liberdade de movimento. Posteriormente, é feita uma segunda medição de amplitudes de respostas de movimentos para a mesma incidência de onda, porém, considerando outra frequência de onda, por exemplo,  $\omega_e = 2$  rad/s. Seguindo esse procedimento de ensaio, para diversos valores de  $\omega_e$  e  $\chi$  é possível obter as curvas de RAO do navio, aplicando a relação (ZUBALY, 2015):

$$RAO_i(\omega_e, \chi) = \frac{S_{ia}}{\zeta_a}, \quad (2.19)$$

onde  $S_{ia}$  representa a amplitude de resposta do  $i$ -ésimo grau de liberdade de movimento (Tabela 2.4) e o  $\zeta_a$  é amplitude das ondas regulares em metros. As amplitudes de respostas dos movimentos de translação são expressas em metros e as amplitudes dos movimentos de rotação em graus.

**Tabela 2.5** – Levantamento das Curvas de RAO.

| $\omega_e$ (rad/s) | $\chi$ (°) | Movimento    | RAO              | Fase         |
|--------------------|------------|--------------|------------------|--------------|
| 1                  | 90         | <i>Sway</i>  | $x_a/\zeta_a$    | $\epsilon_1$ |
| 1                  | 90         | <i>Heave</i> | $y_a/\zeta_a$    | $\epsilon_2$ |
| 1                  | 90         | <i>Surge</i> | $z_a/\zeta_a$    | $\epsilon_3$ |
| 1                  | 90         | <i>Pitch</i> | $\phi_a/\zeta_a$ | $\epsilon_4$ |
| 1                  | 90         | <i>Yaw</i>   | $\psi_a/\zeta_a$ | $\epsilon_5$ |
| 1                  | 90         | <i>Roll</i>  | $v_a/\zeta_a$    | $\epsilon_6$ |

Por meio dos valores de RAO relativos à origem dos sistema de referência do navio, é possível determinar os deslocamentos, velocidades e acelerações em qualquer ponto do casco do navio.

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho, utilizou-se o programa HANSEL para calcular os valores de RAO do navio. O procedimento para obtenção desses parâmetros está descrito no Apêndice A desta dissertação.

## 2.8 Princípio da Superposição Linear

Esse princípio permite que a análise de *seakeeping* do sistema flutuante em ondas irregulares seja realizada com base na superposição das respostas do navio às ondas regulares. Para compreensão desse princípio, considera-se, inicialmente, um navio em deslocamento com velocidade uniforme sob a influência de ondas regulares. Sabe-se que durante esse deslocamento, esse flutuante desenvolverá, também, movimentos (respostas) regulares (ZUBALY, 2015), em função das características das ondas que incidem em seu

casco. Dessa forma, os movimentos regulares resultantes da interação do casco com as ondas regulares podem ser modelados por meio das equações que descrevem o movimento de corpos rígidos, quando submetidos a forças periódicas (ZIMMERMANN, 2015).

Contudo, sabe-se que o objetivo final da análise *seakeeping* é prever o comportamento de um sistema flutuante em uma condição real de mar. Para tanto, é necessário estabelecer um procedimento para determinar os movimentos de um navio sob influência das ondas irregulares, com base na análise da interação entre o casco desse flutuante e as ondas regulares (ZIMMERMANN, 2015). Essa relação torna-se possível quando se aplica o princípio da superposição linear.

Assim, a resposta de um navio em um mar real pode ser determinada a partir da sobreposição linear dos efeitos de cada componente de onda regular que compõe o mar real (JOURNÉE; MASSIE, 2001), conforme ilustrado na Figura 2.16. Esse princípio foi utilizado pela primeira vez no cálculo de movimento de embarcações por St. Denis e Pierson em 1953 (DENIS; PIERSON, 1953).

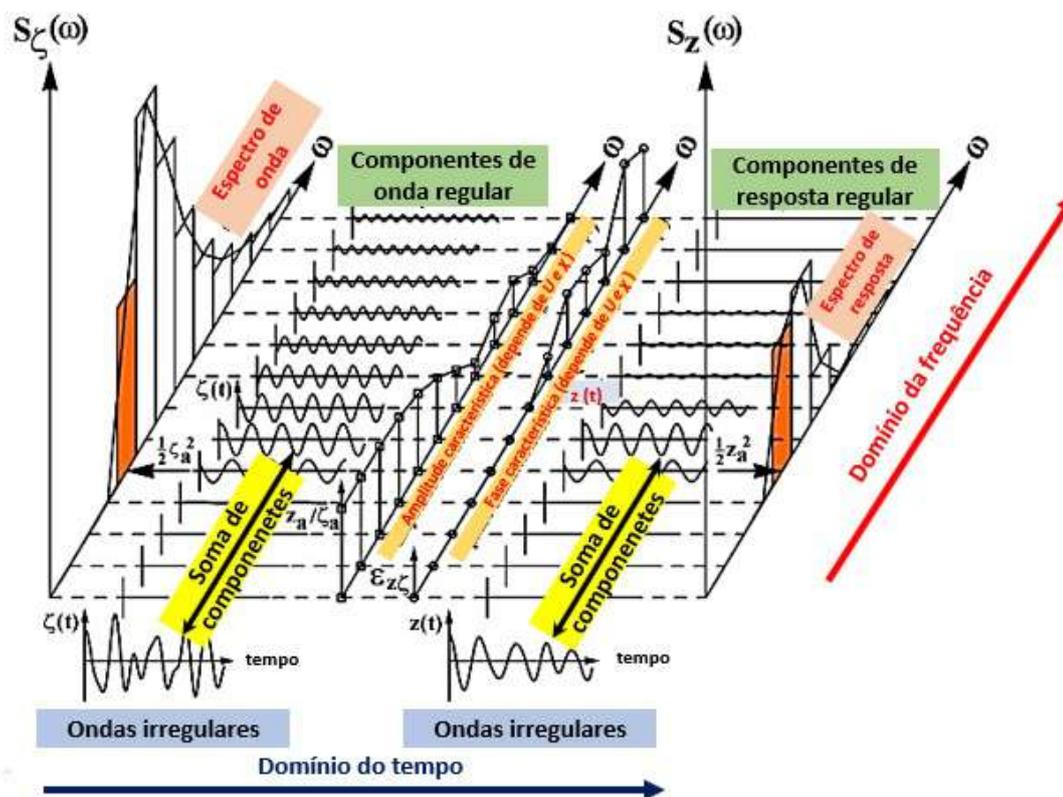


Figura 2.16 – Princípio da superposição (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

A Figura 2.16 ilustra a decomposição do espectro de mar irregular ( $S_\zeta(\omega)$ ) em uma soma de componentes de ondas regulares ( $\zeta(t)$ ). Como consequência da teoria linear, os movimentos do navio podem ser obtidos por meio da soma das respostas desse flutuante em ondas regulares diante de diferentes amplitudes e frequências, obtendo-se, assim, o espectro de respostas do navio ( $S_z(\omega)$ ) (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

## 2.9 Espectro de Respostas

A representação dos espectros de respostas segue o mesmo modelo da representação do espectro de mar (ZIMMERMANN, 2015). Ela descreve a distribuição da energia do movimento do sistema ao ser excitado por um mar irregular. O cálculo do espectro de resposta pode ser feito através da operação descrita pela equação (ZUBALY, 2015):

$$S_{ia(\omega_e)} = S_{\varepsilon(\omega_e)} [RAO_{i(\omega_e, \chi)}]^2, \quad (2.20)$$

onde  $S_{ia(\omega_e)}$  é o espectro de resposta e  $S_{\varepsilon(\omega_e)}$  é o espectro de mar.

O procedimento para o cálculo do espectro de resposta é mostrado na Figura 2.17 (ZUBALY, 2015). Cada componente de onda regular, considerada no espectro de mar real, é representada por um elemento de área com frequência  $\omega_e$ . Assim, multiplicando o espectro de onda na ordenada de  $\omega_e$  pelo quadrado do RAO, mostrado na parte (b) da Figura 2.17, obtém-se, por meio da Eq. 2.20, o ponto do espectro de resposta correspondente à frequência  $\omega_e$ . Repetindo esse procedimento para todo o intervalo de frequências, obtém-se o espectro de resposta, representado na parte (c) da Figura 2.17.

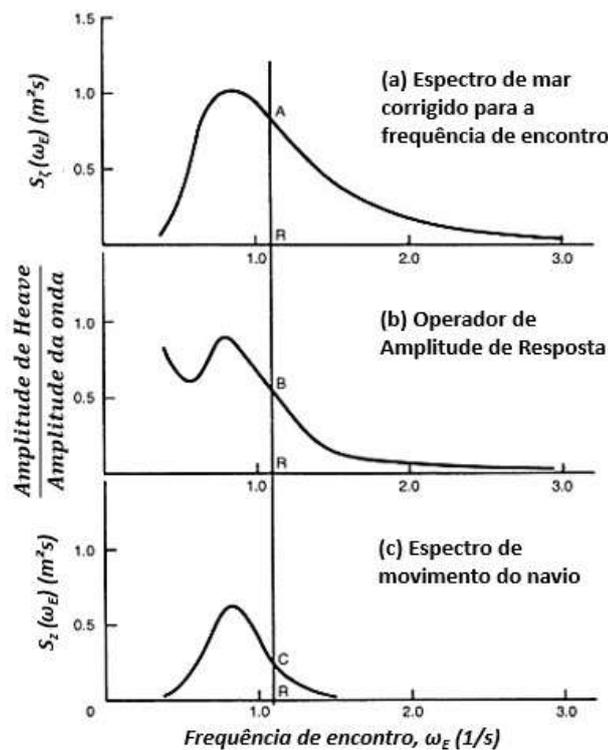


Figura 2.17 – Espectro de respostas do navio (ZUBALY, 2015).

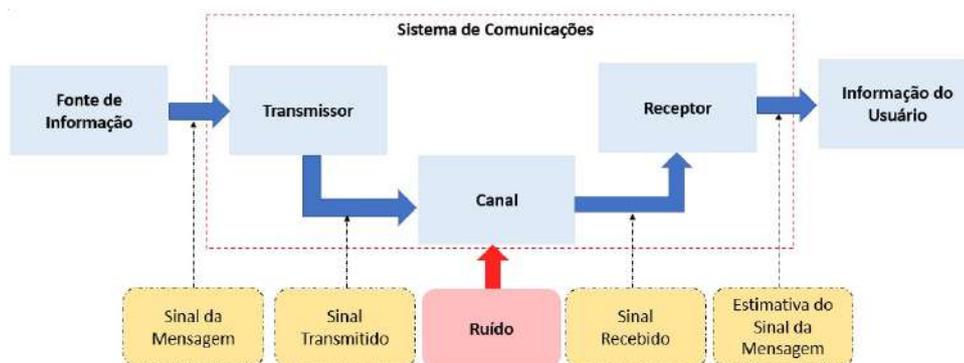
### 3 COMUNICAÇÕES ÓPTICAS NO ESPAÇO LIVRE

A avaliação dos impactos dos fenômenos hidrodinâmicos sobre o sistema FSO foi realizada por meio de métricas de desempenho. Esse trabalho optou por utilizar a taxa de disponibilidade como parâmetro de avaliação, que indica de forma direta a efetividade do subsistema óptico diante dos fenômenos considerados. Para quantificar a taxa de disponibilidade, foram calculadas as perdas do sistema FSO provocadas pelos movimentos desenvolvidos pelo navio nos seis graus de liberdade. Para fundamentar esse processo, são apresentados neste capítulo os principais aspectos de um sistema de comunicações, bem como as etapas envolvidas na modelagem do sistema FSO.

#### 3.1 Sistemas de Telecomunicações

O conceito de telecomunicações está diretamente associado à comunicação à distância. A transmissão de informações em um formato mais primitivo tem uma longa precedência e história, que engloba a era dos sinais de fogo e fumaça (STERLING, 2008). Atualmente, os sistemas de telecomunicações utilizam a energia eletromagnética para representar os dados e um meio físico, tal como, o fio de cobre ou a fibra óptica, para a transmissão de mensagens (HORAK, 2007). Essa transferência de informações pode também ser realizada por meio de um meio sem fio (*wireless*), sendo normalmente acrescentados a este sistema outros dispositivos intermediários, com o objetivo de manter a intensidade do sinal transmitido (HORAK, 2007).

Todavia, independentemente do processo de transmissão de informações, a arquitetura básica de um sistema de telecomunicações é constituída por um transmissor (TX), um canal e um receptor (RX), conforme ilustrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1** – Elementos de um sistema de comunicações (HAYKIN, 2014).

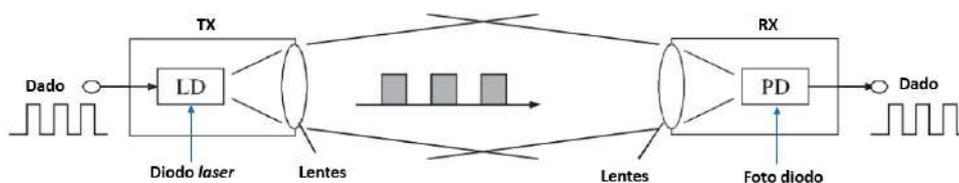
O canal é o meio físico responsável pela interligação entre o transmissor e o receptor. Esses terminais de transmissão e recepção de sinais são posicionados em plataformas

distintas, que podem ser móveis ou estáticas. O transmissor converte as informações do usuário em uma modalidade de sinal compatível com as características do canal. Porém, o sinal, após ser inserido no meio de transmissão, sofre distorções provocadas pelas fontes de ruído e outras imperfeições do canal. Assim, o receptor tem como objetivo captar a versão distorcida desse sinal transmitido, reconstruir a mensagem e extrair a informação do emissor.

## 3.2 Sistema de Comunicações Ópticas

Em um sistema de comunicações ópticas, o canal de propagação representado na Figura 3.1 pode ser classificado em dois tipos: guiado e não guiado. No meio guiado, utiliza-se a fibra óptica para transmissão do feixe de luz. Nesse sistema, os sinais ópticos são inseridos na fibra e sofrem reflexão interna total até atingir a outra extremidade do circuito de comunicações (SINGAL, 2016).

No meio não guiado, o feixe óptico é lançado no espaço livre. A Figura 3.2 mostra uma transmissão óptica com um enlace FSO simplificado.



**Figura 3.2** – Modelo de propagação de feixe óptico (ITU, 2011).

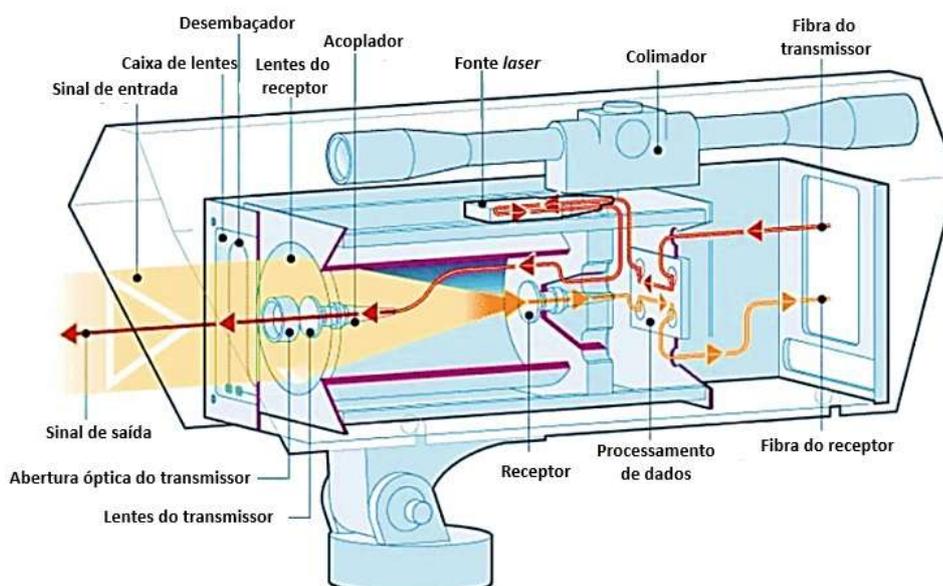
Na Figura 3.2, o transmissor gera um sinal óptico a partir de um sinal elétrico usando uma fonte óptica, que pode ser um diodo *laser* ou um LED (*Light Emitting Diode*). Como a atmosfera impõe perdas severas ao sinal óptico e os *lasers* oferecem uma potência maior, estes são os mais utilizados nos enlaces FSO (CARNEIRO, 2013).

O canal ou enlace FSO é um subsistema composto por um telescópio transmissor, que transforma o sinal óptico em um feixe confinado, pelo espaço livre e por um telescópio receptor, que capta a energia do feixe óptico, após a propagação pela atmosfera, e concentra-a em um ponto focal, para permitir seu acoplamento ao receptor (CARNEIRO, 2013). Este último é composto por um fotodetector, que converte o sinal óptico novamente em um sinal elétrico. Nas seções seguintes, são descritos com maiores detalhes os componentes deste sistema.

## 3.3 Sistema de Comunicações Ópticas no Espaço Livre

### 3.3.1 Transceptor FSO

Um transceptor é um equipamento que engloba as funções de transmissão e recepção em uma única arquitetura. Neste trabalho, o sistema FSO utiliza transceptores FSO, estabelecendo uma comunicação *full duplex* entre o navio e a Força Anfíbia em terra. A Figura 3.3 (ITU, 2011) mostra alguns detalhes deste equipamento.



**Figura 3.3** – Transceptor FSO (BOUCHET et al., 2006).

O equipamento é composto por circuitos eletrônicos, componentes ópticos e lentes específicas dos sistemas de transmissão e recepção de sinais. Os principais componentes desses sistemas são analisados a seguir.

#### 3.3.1.1 Transmissor

O conjunto de lentes na entrada do equipamento faz parte do telescópio transmissor. Esse dispositivo tem como objetivo acoplar o feixe de luz proveniente da fonte óptica ao espaço-livre (CARNEIRO, 2013). Nesse processo de acoplamento é observada uma perda, que é conhecida como perda de inserção no transmissor ( $\alpha_{TX}$ ). Basicamente, as características construtivas do telescópio definem a direção, o ângulo de divergência e o diâmetro inicial do feixe (RODRIGUES, 2012).

Quando o feixe é lançado no espaço livre, ele assume inicialmente o diâmetro da abertura do transmissor, mas sofre, posteriormente, uma expansão na área da seção reta, atingindo o plano de recepção com um diâmetro maior em relação à abertura inicial no plano de transmissão (RODRIGUES, 2012).

Assim, dependendo da aplicação do sistema FSO, torna-se interessante evitar que o feixe óptico chegue ao receptor muito colimado, para que seja reduzida a possibilidade de obstrução por objetos ou animais, como pássaros e insetos, e para que se minimizem os efeitos de desalinhamento (ARNON, 2003).

Demonstra-se, nas próximas subseções, que a abertura do feixe transmitido pode ser controlada por meio do ângulo de divergência e do diâmetro do transmissor, definindo, assim, a abertura do feixe no receptor.

### 3.3.1.2 Receptor

Quando o transceptor FSO capta a potência óptica transmitida, o feixe de luz é focalizado na fibra ou no fotodetector, por meio do telescópio receptor.

O parâmetro mais importante do telescópio receptor é o campo de visão (*Field Of View - FOV*), que define a faixa angular dos feixes incidentes que o telescópio consegue acoplar à fibra receptora ou fotodetector (CARNEIRO, 2013). Quanto maior o FOV do receptor, maior será a potência captada (RODRIGUES, 2012) e menos crítico é o alinhamento, de modo que o enlace será mais robusto contra as variações angulares ocorridas durante a propagação (CARNEIRO, 2013).

De forma análoga ao transmissor, a perda do receptor ( $\alpha_{RX}$ ) é a atenuação sofrida pelo sinal, inerente aos dispositivos elétricos e de acoplamento.

### 3.3.1.3 Sistema ATP

Os mecanismos de Aquisição, Rastreamento e Apontamento (ATP) são normalmente empregados em sistemas de comunicações FSO que utilizam um feixe estreito. Entretanto, a utilização de um feixe largo pode reduzir os requisitos de desempenho desse sistema ATP, podendo até mesmo dispensar o seu emprego (KAYMAK et al., 2018). Em (KAYMAK et al., 2017), por exemplo, os autores propuseram a utilização de uma faixa de ângulo de divergência em enlaces FSO terra-trem. Essa faixa foi proposta, com o objetivo de compensar os efeitos das vibrações verticais e laterais do trem e, ao mesmo tempo reduzir os requisitos de desempenho do espelho de direção rápida (*Fast Steering Mirror - FSM*), principal componente do mecanismo ATP usado nos sistemas FSO desse tipo de aplicação.

Alguns sistemas utilizam um feixe óptico para mensurar o desalinhamento do enlace e controlar a taxa de transmissão de dados. Esse feixe de luz atua como um sinal de controle (*beacon*), conforme ilustrado no diagrama da Figura 3.4.

A Figura 3.4 mostra um diagrama esquemático de um enlace FSO estabelecido entre dois transceptores FSO, desenvolvidos pela empresa ARTOLINK. Esse sistema usa um feixe óptico para transmissão de dados (1550 nm) e um feixe do tipo *beacon* (785 nm), para controle da taxa de transmissão de dados. Esse controle é feito com base

nas informações de desalinhamento coletadas pelos sensores ópticos dos equipamentos. Em um enlace pouco desalinhado, o sistema FSO possui maior taxa de transmissão. Por outro lado, o transceptor reduz essa taxa em função do aumento do desvio do feixe de controle, podendo até mesmo interromper a transmissão em momentos de queda do enlace.

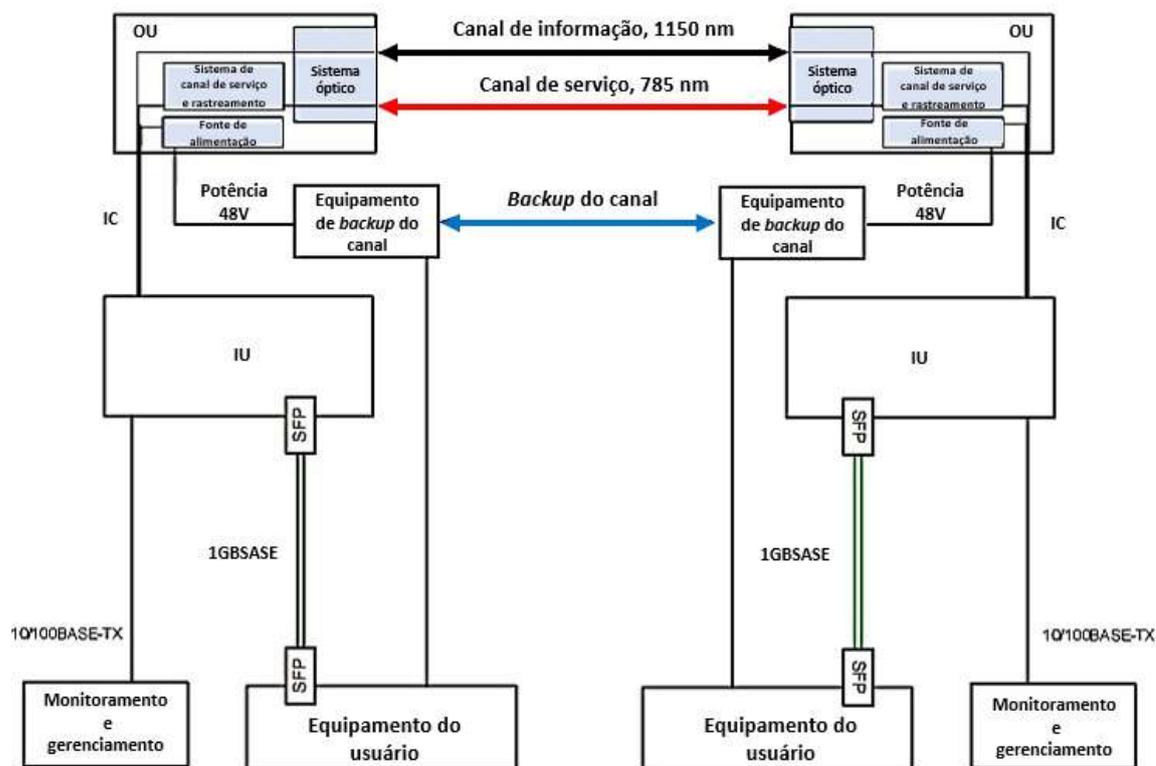


Figura 3.4 – Transmissão do feixe *beacon* em um sistema FSO (ARTOLINK, 2021).

### 3.4 Propagação do Feixe Óptico no Meio Não Guiado

O feixe óptico em um sistema de comunicação FSO é um aglomerado de raios ópticos colimados emitidos pelo transmissor (RODRIGUES, 2012). A irradiância, ou intensidade óptica, é a magnitude usada para descrever a energia por unidade de superfície de um feixe luminoso (SALEH; TEICH, 1991). Esse feixe pode ser mensurado pela potência óptica nele contido através da seguinte relação (POLIAK et al., 2012):

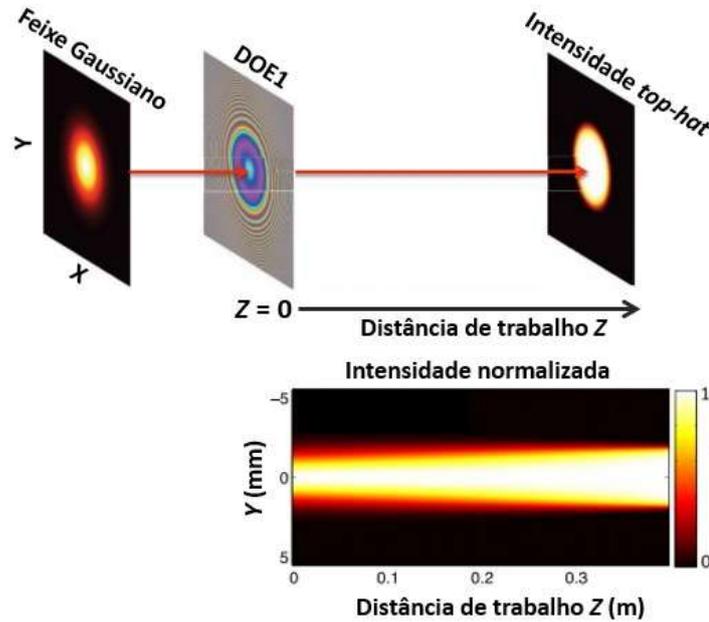
$$P = \int_S I \cdot dS, \tag{3.1}$$

onde  $I$  é a intensidade óptica do feixe e  $S$  é área da abertura do sistema óptico.

#### 3.4.1 Modelos de Propagação do Feixe Óptico

O feixe óptico transmitido pode ser modelado por perfis de distribuição de intensidade. Em sistemas FSO, utiliza-se normalmente o modelo Gaussiano Circular ou o feixe

uniforme ("top-hat") (BLOOM et al., 2003).



**Figura 3.5** – Conversão de um feixe Gaussiano em um feixe "top-hat" (PAL et al., 2018).

A Figura 3.5 descreve um processo de conversão de um feixe Gaussiano em um feixe do tipo "top-hat", por meio de um elemento de óptica difrativa, DOE (*Diffractive Optical Elements*) (PAL et al., 2018). Assim, antes de incidir no dispositivo (DOE1), o feixe Gaussiano concentra boa parte de sua energia em um ponto central e essa intensidade reduz em função do aumento do distanciamento desse ponto em relação ao centro do feixe óptico. Em seguida, após atingir o DOE1 e propagar-se por uma distância  $z = 0,4$  m, a intensidade óptica do feixe Gaussiano distribui-se igualmente ao longo da sua seção reta quando o feixe é transmitido. Dessa forma, a potência óptica contida em um feixe uniforme pode ser definida pela seguinte relação (BOUCHET et al., 2006):

$$P = I \cdot S. \quad (3.2)$$

No feixe Gaussiano as distribuições transversais de campo elétrico e intensidade óptica (irradiação) são aproximadas por funções Gaussianas (MAJUMDAR, 2015). Ele é considerado como um subproduto natural do processo de formação do *laser* em uma cavidade ressonante (SIEGMAN, 1965). Por esse motivo, muitos *lasers* utilizados em comunicações ópticas operam no modo transversal eletromagnético fundamental ( $TEM_{00}$ ), emitindo um perfil Gaussiano aproximado (KOGELNIK; LI, 1966). Desse modo, a irradiância, ou intensidade óptica desse feixe, é dada por (TRISNO, 2006):

$$I(r, L) = I_0 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_L^2}\right), \quad (3.3)$$

onde,  $r_t$  é o raio da abertura do transmissor FSO,  $r_L$  é o raio da seção reta do feixe óptico,  $r$  é a distância radial do centro do feixe óptico e  $I_0$  é a intensidade óptica máxima. A Eq. 3.3 assume a seguinte forma quando expressa em coordenadas retangulares:

$$I(x, y, z) = I_0 \frac{r_t^2}{r_L^2(z)} \exp \left[ -\frac{2(x^2 + y^2)}{r_L^2(z)} \right]. \quad (3.4)$$

Sabe-se que a intensidade óptica é uma propriedade do feixe, contudo, a potência captada pela abertura do receptor é obtida pela integral de superfície da intensidade óptica ao longo da área  $S$  do dispositivo fotodetector (POLIAK et al., 2013):

$$P_{RX} = \int_S I_0 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp \left[ -\frac{2(x^2 + y^2)}{r_L^2} \right] dS. \quad (3.5)$$

Na modelagem de enlaces FSO, com distribuição uniforme, não são percebidas variações nos níveis da potência óptica recebida, nas situações em que o desalinhamento é menor do que as dimensões da seção reta do feixe óptico (POLIAK, 2014). Esse comportamento foi confirmado em nossos trabalhos iniciais, quando foi feita a modelagem de um sistema FSO, com feixe uniforme, instalado em uma plataforma marítima, sob a influência do desalinhamento provocado pelo movimento de afundamento do navio (*heave*) (GURGEL et al., 2020).

Com o propósito de propor um modelo mais preciso para a análise de desempenho do sistema FSO, optou-se, neste trabalho, pela utilização do feixe Gaussiano circular.

### 3.5 Difração, Divergência e Geometria de Captação

Os efeitos da difração podem ser observados por meio da interação de um feixe luminoso com um obstáculo de dimensões comparáveis ao comprimento da onda incidente. Esse fenômeno é percebido em sistemas FSO quando o feixe luminoso emitido pela fonte óptica incide no encaixe da lente circular do transceptor FSO. Assim, à medida que o feixe óptico propaga pelo canal atmosférico, ele sofre divergência e, conseqüentemente, um aumento na área da seção reta (POLIAK, 2014). A parcela da potência óptica contida nesse feixe e não captada pela abertura circular do receptor é chamada de perda por divergência ou atenuação geométrica (KAUSHAL; JAIN; KAR, 2017).

O aumento da área do feixe transmitido está diretamente associado ao aumento do raio desse feixe óptico ( $r_L$ ) provocado pelo efeito da difração. Define-se, normalmente, o raio do feixe óptico de duas formas. A primeira considera o diâmetro no qual a irradiância do feixe óptico atinge  $1/e^2$  (13,5%) do valor de pico, medido em uma seção reta do feixe. O segundo conceito considera o diâmetro no qual a irradiância cai a 50% do seu valor de pico,

que é chamada de largura completa à meia altura (*Full Width at Half Maximum - FWHM*) (CARNEIRO, 2013). Neste trabalho, optou-se pela utilização da primeira definição.

Dessa forma, a difração provoca um espalhamento do feixe óptico transmitido. Sendo assim, mesmo que o *laser* produza um feixe perfeitamente colimado, a difração seria observada durante a propagação da onda óptica (POLIAK, 2014). Para um feixe Gaussiano inicialmente colimado, o diâmetro do feixe é dado por (CVI Melles Griot, 2009).

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2}, \quad (3.6)$$

onde  $w_0$  é o menor diâmetro ou cintura do feixe (*beam waist*),  $z$  é a distância propagada a partir da cintura e  $w(z)$  é o diâmetro do feixe óptico ou (*spot size*).

Para valores grandes de  $z$  ( $z \gg \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$ ), a Eq. 3.6 aproxima-se assintoticamente de:

$$w(z) = \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0}. \quad (3.7)$$

Desta forma, o contorno onde a irradiância cai a  $1/e^2$  do seu valor de pico se aproxima de um cone de diâmetro angular dado por:

$$\theta = 2 \cdot \arctan \left( \frac{w(z)}{z} \right) \approx \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}, \quad (3.8)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de divergência, que define a divergência ou espalhamento do feixe óptico.

A Figura 3.6 mostra um exemplo de divergência do feixe óptico. O pulso inicialmente estreito sofre um alargamento na medida em que se afasta do eixo de origem.

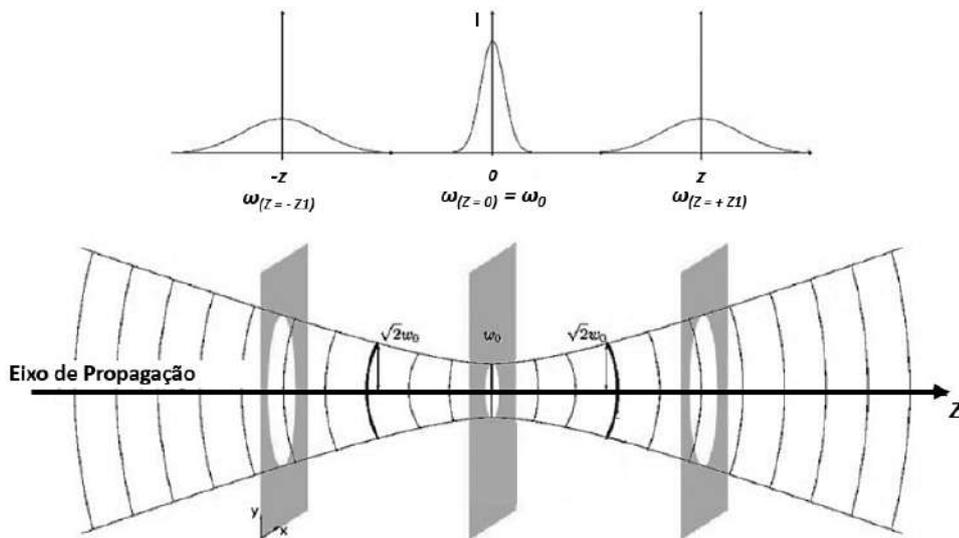
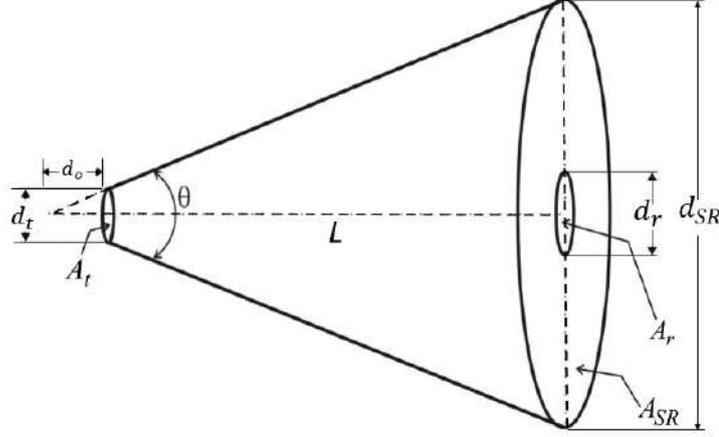


Figura 3.6 – Distribuição da intensidade do feixe óptico (JÄHRLING; SAGHAFI, 2011).

A interligação entre os pontos nessas curvas, onde a irradiância decresce  $1/e^2$  (13,5%) do valor de pico, gera uma superfície aproximadamente cônica, chamado de cone de divergência, conforme ilustrado na Figura 3.7.



**Figura 3.7** – Cone de divergência da atenuação geométrica (RODRIGUES, 2012).

Na Figura 3.7,  $d_o$  é a distância entre o plano do transmissor e o vértice do cone,  $d_t$ ,  $d_r$  e  $d_{SR}$  são os diâmetros de abertura do transmissor, do receptor e do feixe óptico e  $A_t$ ,  $A_r$  e  $A_{SR}$  são as áreas do transmissor, do receptor e do feixe, respectivamente. Por meio de relações trigonométricas estabelecidas entre as dimensões do cone da figura, estima-se o diâmetro efetivo do feixe  $d_{SR}$  na distância  $L$ , onde se encontra o receptor. Considerando  $\theta$  suficientemente pequeno tal que  $\tan(\theta/2) \cong \theta/2$ , define-se a relação (RODRIGUES, 2012):

$$\tan(\theta/2) = \frac{d_{SR}/2}{L + d_o} = \frac{d_t/2}{d_o} \cong \frac{\theta}{2} \Rightarrow d_{SR} \cong d_t + \theta.L. \quad (3.9)$$

O diâmetro  $d_{SR}$  pode ser usado para o cálculo da respectiva abertura do feixe  $A_{SR}$ , através de  $A_{SR} = \pi (d_{SR}/2)^2$ . O mesmo pode ser feito para o cálculo das áreas do transmissor  $A_t$  e do receptor  $A_r$  (RODRIGUES, 2012).

Assim, é possível estabelecer uma relação entre as áreas  $A_r$  e  $A_{SR}$  e as potências ópticas do receptor ( $P_r$ ) e do feixe óptico ( $P_{SR}$ ) na distância ( $z = L$ ), por meio das seguintes expressões (RODRIGUES, 2012):

$$\frac{P_{SR}}{A_{SR}} = \frac{P_r}{A_r} \Rightarrow \frac{P_r}{P_{SR}} = \frac{A_r}{A_{SR}}. \quad (3.10)$$

A Eq. 3.10 pode ser reescrita ao se considerar as aberturas circulares  $A_r = \pi (d_r/2)^2$  e  $A_{SR} = \pi (d_{SR}/2)^2$  e o cálculo de  $d_r$  da Eq. 3.9 (SANTOS, 2008). Assim:

$$\frac{P_r}{P_{SR}} = \frac{d_r^2}{d_{SR}^2} = \frac{d_r^2}{(d_t + \theta.L)^2}. \quad (3.11)$$

Dessa forma, a atenuação geométrica,  $\alpha_{geo}$ , é definida pela relação entre a potência captada pelo receptor  $P_r$  e potência óptica do feixe  $P_{SR}$ . Ou seja (BLOOM et al., 2003):

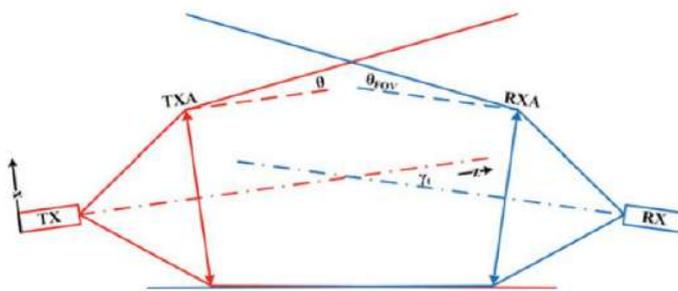
$$\alpha_{geo} = \frac{P_r}{P_{SR}} = \frac{d_r^2}{(d_t + \theta \cdot L)^2}. \quad (3.12)$$

Para a determinação da Eq. 3.11, considera-se que a área do receptor é contida pela área do feixe ( $A_r \subset A_{SR}$ ). Não haverá atenuação geométrica ( $\alpha_{geo} = 1$ ) se a abertura do receptor for maior e contiver a abertura do feixe ( $A_r \supset A_{SR}$ ) (RODRIGUES, 2012).

### 3.6 Desalinhamento do Feixe Óptico Gaussiano Circular

O canal óptico e os erros de apontamento são aspectos significativos na determinação das perdas por divergência do feixe (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018). Assim, para garantir o funcionamento de um enlace FSO, é essencial que o feixe de luz transmitido e o campo de visão do receptor (FOV) englobem o transceptor na extremidade oposta do enlace (BLOOM et al., 2003). Até mesmo sistemas FSO, aparentemente estacionários, utilizam algum mecanismo de alinhamento para minimizar os erros de apontamento. Enlaces FSO entre edifícios utilizam, por exemplo, transceptores com ATP, para compensar as perdas por desalinhamento provocadas pela expansão térmica dos materiais de fixação, vibrações nas bases e ação dos ventos (KAYMAK et al., 2017).

A Figura 3.8 ilustra uma situação em que o TX e o RX sofrem um desvio angular. Nessa figura, o eixo óptico do feixe é a linha imaginária no eixo longitudinal que divide o cone de divergência em duas partes iguais. Da mesma forma, um eixo imaginário passa pelo centro da abertura circular de um transceptor (TXA e RXA), dividindo-o em dois semicírculos simétricos.

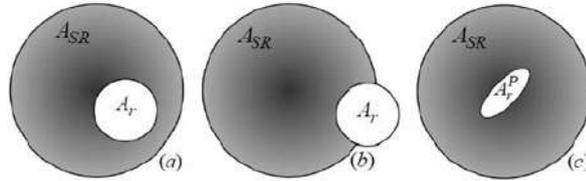


**Figura 3.8** – Desalinhamento do feixe óptico (UYSAL et al., 2016).

Quando um enlace FSO está idealmente alinhado, o eixo óptico do feixe e os eixos de abertura dos transceptores (TXA e RXA) são simétricos e idênticos. Uma atenuação adicional é observada quando o eixo do feixe e um dos eixos de abertura perdem

suas características simétricas e idênticas, dando origem a um desvio e uma perda por desalinhamento, também, conhecida como erro de apontamento (UYSAL et al., 2016).

Os casos possíveis de desalinhamento do feixe cônico uniforme podem ser observados nas ilustrações da Figura 3.9, onde  $A_{SR}$  representa a área da seção reta do feixe e  $A_r$ , a área de abertura do receptor. Essa figura ilustra um transmissor pouco transladado (a), um transmissor muito transladado (b) e uma rotação entre TX e RX (c). Para todas essas situações, o parâmetro  $\alpha_{geo}$  pode ser obtido por meio da relação  $A_r/A_{SR}$ . Para o caso (a), a Eq. 3.10 continuará válida. Para o caso (b), o termo  $A_r$  da Eq. 3.10 deve ser substituído pelo cálculo da interseção entre as áreas  $(A_r \cap A_{SR})/A_{SR}$ .



**Figura 3.9** – Possibilidades de desalinhamento do feixe cônico uniforme (RODRIGUES, 2012).

Para o caso (c) em que um dos transceptores ou ambos sofrem um desvio angular, provocado por variações dos ângulos de azimute e/ou elevação, a figura geométrica descrita no plano de interseção entre o feixe óptico e o receptor pode assumir um formato elíptico (CORRÊA, 2016). Dessa forma, para calcular a atenuação geométrica, o denominador da Eq. 3.10 deve ser substituído por  $A_r^P$  (projeção de  $A_r$  em  $A_{SR}$ ).

### 3.6.1 Perdas Geométricas e por Desalinhamento

Nas subseções anteriores, mostrou-se que a atenuação geométrica de um enlace FSO perfeitamente alinhado e modelado com um feixe uniforme pode ser obtida por meio da relação  $P_r/P_{SR}$ . Essa relação é válida, também, para o cálculo das perdas geométricas em um sistema FSO, modelado com um feixe Gaussiano alinhado. Nesse sentido, essa atenuação pode ser obtida por meio da Eq. 3.13, que possui uma solução fechada e pode representar, por exemplo, a atenuação geométrica em um enlace FSO estabelecido entre um transmissor e um receptor circular de raio  $r_r$  perfeitamente alinhados (POLIAK et al., 2013).

$$\alpha_{geo} = \frac{\int_S I(x, y, z = L) ds}{\iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z = 0) dx dy} = 1 - \exp\left(-\frac{r_r^2}{r_L^2(L)}\right). \quad (3.13)$$

Para incluir os efeitos do desalinhamento radial no modelo, é necessário transladar os eixos sobre a Eq. 3.5. Nesse sentido, adotando um sistema de coordenadas retangulares, o pico do feixe Gaussiano pode ser transladado por  $x_c$  e  $y_c$ , para um ponto afastado da

origem, representando os movimentos translacionais de TX, enquanto o centro do RX permanece na origem do sistema de coordenadas. Portanto, a potência do feixe desalinhado, no plano receptor ( $z = L$ ), pode ser escrita como (AZZOLIN; GURGEL; CARNEIRO, 2021):

$$P_{RX} = \int_S I_0^2 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp \left[ -\frac{2[(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2]}{r_L^2} \right] dS, \quad (3.14)$$

Devido ao seu ganho de desempenho em simulações de enlaces desalinhados, especialmente em sistemas móveis, foi utilizada uma formulação, proposta recentemente, para o cálculo da atenuação geométrica e por desalinhamentos radiais, dada, em dB, por (AZZOLIN; GURGEL; CARNEIRO, 2021):

$$\alpha_{gm} [dB] = 10 \cdot \log_{10} \left[ 1 - Q_1 \left( \frac{2d}{r_L}, \frac{2r_r}{r_L} \right) \right], \quad (3.15)$$

onde  $Q_1$  é a função Q de Marcum de ordem 1,  $r_r$  é o raio de abertura do receptor e  $d$  é o desalinhamento total do feixe transmitido no plano de recepção. A descrição detalhada da dedução matemática da Eq. 3.15 é apresentada no Apêndice B.

A Eq. (3.15) também pode ser usada para incluir o desalinhamento angular entre o TX e o RX, ou seja, os movimentos de rotação. Dessa forma, o coeficiente de atenuação,  $\alpha_{gm}$ , pode ser calculado, aproximando  $d$  por:

$$d = \sqrt{(x_c)^2 + (y_c)^2}. \quad (3.16)$$

Para a posição do navio descrita no cenário da Figura 1.7, é válida a aproximação:

$$x_c = x_p + L \cdot \tan(\psi), \quad (3.17)$$

$$y_c = y_p + L \cdot \tan(\nu), \quad (3.18)$$

Substituindo as Eq. 3.17 e 3.18 na Eq. 3.16, a expressão para o cálculo do desalinhamento total do feixe óptico assume a seguinte forma:

$$d = \sqrt{[x_p + L \cdot \tan(\psi)]^2 + [y_p + L \cdot \tan(\nu)]^2}. \quad (3.19)$$

Em relação aos outros dois movimentos, o  $z_c$  foi incluído como variações em  $L$  e a rotação de *roll* ( $\phi$ ) foi incluída nos cálculos de  $x_c$  e  $y_c$ , por meio das Eq. 2.11 e 2.12.

### 3.7 Fenômenos no Espaço Livre

Diferentemente da previsibilidade normalmente observada em meios confinados, como o cabeamento de fibra óptica, o canal atmosférico é caracterizado pela alta variação temporal, diversidade de composição, temperatura e densidade, aumentando, assim, a complexidade na tarefa de estimação das perdas do canal (RODRIGUES, 2012). Os principais fenômenos considerados na análise de desempenho de um sistema FSO são indicados na Tabela 3.1.

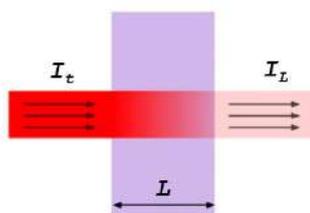
**Tabela 3.1** – Perdas no Canal Óptico

| Parâmetro       | Tipo de Perda            | Fenômeno Causador                            |
|-----------------|--------------------------|--|
| $\alpha_{geo}$  | Atenuação Geométrica     | Divergência e geometria de captação do feixe |
| $\alpha_{atm}$  | Atenuação Atmosférica    | Absorção e espalhamento do feixe             |
| $\alpha_{cint}$ | Atenuação por Cintilação | Turbulência atmosférica                      |

De uma forma geral, o ambiente complexo, dinâmico e aleatório em torno do canal atmosférico, pode afetar as características do feixe óptico transmitido, provocando uma redução na potência óptica e flutuações de fase do sinal (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018). Esses fenômenos serão considerados na modelagem do enlace marítimo de comunicações FSO e, por esse motivo, serão analisados nas próximas subseções.

#### 3.7.1 Atenuação Atmosférica

Os fótons dos raios ópticos podem ser absorvidos por átomos e moléculas do meio ou por partículas suspensas (KAUSHAL; JAIN; KAR, 2017). Esse fenômeno é conhecido como absorção e ocorre devido ao processo de interação entre o feixe óptico transmitido e a mistura de gases e aerossóis presentes na atmosfera (CARNEIRO, 2013). A Figura 3.10 mostra como a irradiância transmitida  $I_t$  decai para um valor de irradiância do feixe  $I_L$ , após este ter se propagado por uma distância  $L$ , no espaço livre (RODRIGUES, 2012).

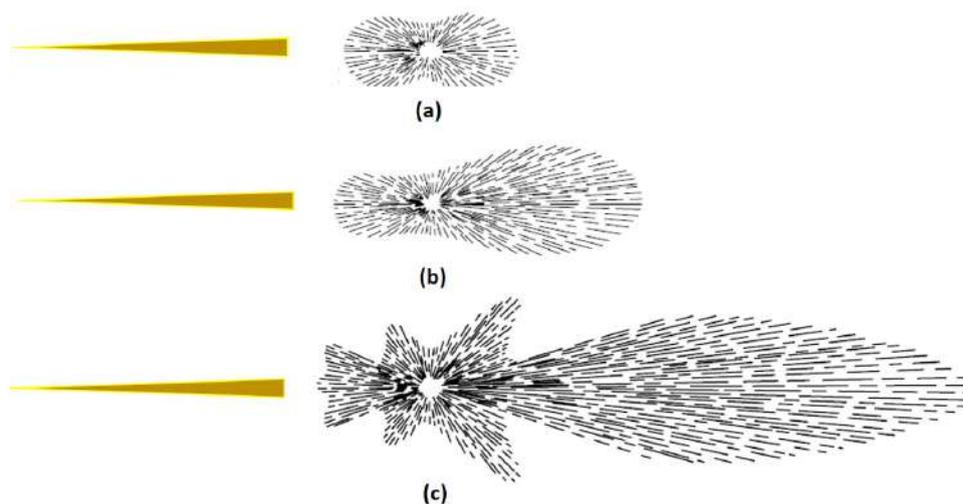


**Figura 3.10** – Decaimento da irradiância devido à absorção atmosférica (RODRIGUES, 2012).

Na Figura 3.10, a diferença  $I_L - I_t$  representa uma parcela da irradiância óptica convertida em calor pelo processo de absorção (RODRIGUES, 2012). Esse fenômeno é

conhecido como absorção molecular ( $\alpha_m$ ), quando essas perdas são causadas pelos gases presentes na atmosfera. Quando a absorção ocorre por partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera, ela é chamada de absorção por aerossóis ( $\alpha_s$ ) (RODRIGUES, 2012). Esses parâmetros são mensurados estatisticamente pelas suas respectivas taxas de absorção (BOUCHET et al., 2006).

O espalhamento atmosférico é um fenômeno que provoca o redirecionamento da energia óptica transmitida (KAUSHAL; KADDOUM, 2017b). Conseqüentemente, essa energia espalhada não é captada pelo receptor óptico, provocando, assim, outra atenuação no enlace FSO. Quando o feixe óptico incide sobre uma determinada partícula, ocorre um espalhamento de energia em várias direções, formando alguns tipos de espalhamento diferentes (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018), conforme representado na Figura 3.11.



**Figura 3.11** – Diagrama de espalhamento: (a) Rayleigh, (b) Mie, (c) Não-seletivo (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018).

O efeito do espalhamento depende do raio das partículas  $r_p$  e do comprimento de onda do feixe óptico ( $\lambda$ ). Define-se, assim, um número adimensional, chamado de parâmetro de tamanho ( $x_o$ ), por meio da seguinte relação:

$$x_o = \frac{2\pi r_p}{\lambda}. \quad (3.20)$$

Assim, se  $x_o \ll 1$ , o processo de espalhamento é classificado como Rayleigh (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018), conforme Figura 3.11(a). Se  $x_o = 1$ , o processo é designado como espalhamento Mie (Figura 3.11(b)) e se  $x_o \gg 1$ , é classificado como espalhamento não-seletivo (Figura 3.11(c)), sendo modelado pelas teorias da óptica geométrica (BOUCHET et al., 2006).

Dessa forma, o coeficiente de atenuação é a soma das taxas de absorção e de espalhamento provocados por gases e aerossóis presentes na atmosfera, conforme a expressão (KAUSHAL; JAIN; KAR, 2017):

$$\gamma = \underbrace{\alpha_m}_{\text{abs. molecular}} + \underbrace{\alpha_s}_{\text{abs. por aerossóis}} + \underbrace{\beta_m}_{\text{esp. molecular}} + \underbrace{\beta_s}_{\text{esp. por aerossóis}}. \quad (3.21)$$

Assim, a atenuação atmosférica que o sinal sofre durante a propagação pode ser descrita pela Lei de Beer (KIM et al., 1998):

$$\alpha_{atm} [dB/km] = \frac{-10}{L} \log \left( \frac{P(L)}{P(0)} \right), \quad \frac{P(L)}{P(0)} = e^{-\gamma L}. \quad (3.22)$$

Como as gotas de chuva apresentam dimensões elevadas, em geral, muito maiores que os comprimentos de onda utilizados em enlaces FSO, a atenuação gerada por elas enquadra-se no espalhamento não-seletivo (CARNEIRO, 2013).

O modelo usual para o cálculo do coeficiente de espalhamento por chuvas é dado por (BOUCHET et al., 2006):

$$\beta = a (R_p)^b, \quad (3.23)$$

onde  $\beta$  é dado em dB/km,  $R_p$  é a taxa de precipitação em mm/h e  $a$  e  $b$  são coeficientes de ajuste que dependem das características de precipitação da região de funcionamento do sistema FSO.

Diante de uma possível indisponibilidade dos parâmetros característicos da região, utiliza-se normalmente a relação de Carbonneau (CARBONNEAU; WISELY, 1998), que fornece um coeficiente de atenuação por chuvas, em dB/km, onde  $a = 1,076$  e  $b = 0,67$ .

Na Tabela 3.2, é feita uma comparação entre as condições de tempo e as taxas de precipitação que geram visibilidades semelhantes, além de serem mostradas as perdas atmosféricas características de cada visibilidade.

Na Tabela 3.2, verifica-se que as condições de nevoeiro, de moderado a denso, geram reduções na visibilidade maiores que tempestades de chuva (COLVERO, 2005). Neste trabalho, foi estabelecida uma faixa operacional do enlace, com base na atenuação atmosférica, de  $\alpha_{atm} = 1$  a 2 dB/km, correspondente às condições de tempo limpo e neblina fina, e no comprimento do enlace, dentro da faixa de 3 a 5 km.

### 3.7.2 Turbulência Atmosférica

A radiação solar absorvida pela Terra faz com que o ar próximo à superfície terrestre seja mais quente em relação ao ar contido nas camadas mais elevadas (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018). Conseqüentemente, a camada de ar mais quente

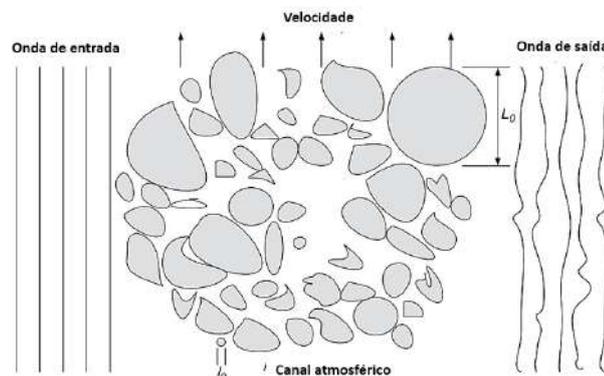
**Tabela 3.2** – Código Internacional de Visibilidade (KIM et al., 1998).

| Condição do tempo | Tipo de Precipitação | Precipitação (mm/h) | Visibilidade | Perda (dB/km) |
|-------------------|----------------------|---------------------|--------------|---------------|
| Nevoeiro denso    |                      |                     | 0 m          |               |
|                   |                      |                     | 50 m         | 315,0         |
| Nevoeiro grosso   |                      |                     | 200 m        | 75,3          |
|                   |                      |                     | 500 m        | 28,9          |
| Nevoeiro moderado |                      |                     | 770 m        | 18,3          |
|                   |                      |                     | 1 km         | 13,8          |
| Nevoeiro leve     | Tempestade           | 100                 | 1,9 km       | 6,9           |
|                   |                      |                     | 2 km         | 6,6           |
| Nevoeiro fino     | Chuva forte          | 25                  | 2,8 km       | 4,6           |
|                   |                      |                     | 4 km         | 3,1           |
| Neblina           | Chuva média          | 12,5                | 5,9 km       | 2,0           |
|                   |                      |                     | 10 km        | 1,1           |
| Neblina fina      | Chuva fraca          | 2,5                 | 18,1 km      | 0,6           |
|                   |                      |                     | 20 km        | 0,54          |
| Limpo             | Garoa                | 0,25                | 23 km        | 0,47          |
|                   |                      |                     | 50 km        | 0,19          |

torna-se menos densa e sobe, misturando-se turbulentamente ao ar mais frio circundante, fazendo com que a temperatura do ar flutue aleatoriamente. Essas inhomogeneidades causadas pela turbulência podem ser vistas como células discretas, ou redemoinhos de diferentes temperaturas, agindo como prismas refrativos de diferentes tamanhos e índices de refração (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018), conforme ilustrado na Figura 3.12:

Essas diferenças de índice de refração causam desvios nos feixes de luz que propagam por essa região, podendo levar, ocasionalmente, a um número elevado de erros em um curto período de tempo (da ordem de 1 ms ou menos) em sistemas de comunicação no espaço livre (KIM et al., 1998).

A medição exata da turbulência na atmosfera requer um conhecimento das características de muitos bolsões de ar (células) em tempo real. Em função da alta complexidade



**Figura 3.12** – Turbulência atmosférica (GHASSEMLOOY; POPOOLA; RAJBHANDARI, 2018).

envolvida nesse processo, opta-se por uma aproximação adotando uma teoria de campo médio, que é o processo de representar todo o fenômeno por meio de um único parâmetro estatístico desprezando, assim, possíveis flutuações (RODRIGUES, 2012). Nesse sentido, a turbulência atmosférica é normalmente caracterizada pelo parâmetro estrutural do índice de refração,  $C_n^2$ , que representa a magnitude dos efeitos da turbulência na propagação do feixe óptico (COLVERO, 2005).

Assim, a classificação da turbulência atmosférica pode ser realizada com base na medida da variância da densidade superficial de potência instantânea em escala logarítmica, parâmetro conhecido como variância de Rytov, definida como (TRISNO, 2006):

$$\sigma_R^2 = 1,23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6}, \quad (3.24)$$

onde  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda e  $L$  é a distância em metros. Para  $\sigma_R^2 \ll 1$ , a turbulência é considerada fraca, para  $\sigma_R^2 \sim 1$ , turbulência moderada, e para  $\sigma_R^2 \gg 1$ , turbulência forte.

Muitos modelos estimam o valor do parâmetro  $C_n^2$  em função de fatores facilmente medidos, como a temperatura e a pressão atmosféricas (SANCHEZ, 2000). Medições de  $C_n^2$ , como as realizadas em (OSORIO, 2005), indicam uma significativa elevação dos seus valores da noite para o dia. O parâmetro  $C_n^2$  pode se elevar de  $10^{-15}$  para  $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ , que representam os valores característicos dos regimes de turbulência fraca e forte, respectivamente. Neste trabalho, optou-se pela utilização do parâmetro  $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ .

Dentre os principais efeitos, causados no feixe luminoso em decorrência da turbulência, destacam-se o vagueamento do feixe (*beam wander*), o espalhamento do feixe (*beam spreading*) e a cintilação (CORRÊA, 2016). Dentre esses efeitos, a cintilação é a que mais afeta os enlaces FSO (CARNEIRO, 2013), de modo que será vista com maiores detalhes neste trabalho.

### 3.7.2.1 Atenuação por Cintilação

O efeito de cintilação é extremamente importante para enlaces FSO e para realizar um estudo completo desse fenômeno, é necessária uma abordagem estatística do problema. No entanto, alguns autores trabalham com a ideia de um coeficiente de atenuação de cintilação, trazendo uma simplificação determinística para esse efeito estatístico. Para este trabalho, o efeito do desalinhamento é considerado como tendo um impacto muito maior no desempenho do enlace do que a cintilação. Assim, optou-se por utilizar o modelo simplificado, baseado no método de Andrews descrito em (DORDOVÁ; WILFERT, 2010).

A cintilação é provocada pelas mudanças de fase sofridas por parcelas do feixe transmitido. Essas alterações de fase ocorrem devido à propagação por múltiplos percursos através de bolhas de ar quente menores que o diâmetro do feixe. Quando uma parcela do feixe alcança o receptor, ocorrem interferências construtivas e destrutivas aleatórias, provocando flutuações na irradiância do sinal recebido com distribuição estocástica ao redor de um valor médio (ANDREWS; PHILLIPS, 2005).

Dessa forma, a flutuação desse sinal óptico é o fator causador da cintilação. Ela pode ser caracterizada pela variância normalizada da irradiância da onda óptica, também, conhecida como índice de cintilação (ANDREWS; PHILLIPS, 2005):

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \quad (3.25)$$

onde  $\langle \dots \rangle$  representa a média conjunta.

Sob condições de turbulência fraca, a variância de Rytov é muito menor que 1 ( $\sigma_R^2 \ll 1$ ) e o índice de cintilação é aproximadamente igual à variância de Rytov, ou seja,  $\sigma_I = \sigma_R$  (TRISNO, 2006). Desta forma, a atenuação da potência do feixe óptico através da atmosfera, devida à cintilação, pode ser aproximada por (RODRIGUES et al., 2013):

$$\alpha_{cint} = \exp(\sigma_I). \quad (3.26)$$

Sob o regime de turbulência forte ( $\sigma_R^2 \gg 1$ ), o índice de cintilação,  $\sigma_I^2$ , pode ser escrito como (CARNEIRO, 2013):

$$\sigma_I^2 = \exp(\sigma_{\ln x}^2 + \sigma_{\ln y}^2). \quad (3.27)$$

Para ondas planas,  $\sigma_{\ln x}^2$  e  $\sigma_{\ln y}^2$  são, respectivamente (ANDREWS, 2005):

$$\sigma_{\ln x}^2 = \frac{0,49\sigma_R^2}{\left(1 + 0,65\delta^2 + 1,11\sigma_R^{12/5}\right)^{7/6}}, \quad (3.28)$$

$$\sigma_{\ln y}^2 = \frac{0,51\sigma_R^2 \left(1 + 0,69\sigma_R^{12/5}\right)^{-5/6}}{1 + 0,9\delta^2 + 0,62\delta^2\sigma_R^{12/5}}, \quad (3.29)$$

onde  $\delta = \sqrt{kd_{SR}^2/4L}$ .

### 3.8 Análise de desempenho

Algumas das simulações descritas no próximo capítulo foram realizadas com o objetivo de avaliar a influência dos movimentos do navio no desempenho do sistema FSO. Para o cálculo das perdas totais do enlace, em dB, foi utilizada a seguinte expressão (CARNEIRO; RODRIGUES; GIRALDI, 2012):

$$\alpha_T [dB] = \alpha_{gm} + \alpha_{atm} \cdot L + \alpha_{cint} + \alpha_{TX} + \alpha_{RX}, \quad (3.30)$$

onde  $\alpha_{cint}$  é a perda por cintilação e  $\alpha_{TX}$  e  $\alpha_{RX}$  são, respectivamente, as perdas por inserção nas interfaces fibra-telescópio do transmissor e do receptor. Todas essas perdas são expressas em dB.

As simulações foram realizadas com o objetivo de avaliar a influência dos movimentos do navio sobre o desempenho do sistema FSO. Essas análises foram desenvolvidas a partir da observação da potência recebida ao longo do tempo. Nesse contexto, sabe-se que a taxa de disponibilidade do sistema ( $\eta$ ), em comunicações, é normalmente expressa como uma porcentagem do tempo de funcionamento do sistema no período de um ano. No entanto, face às características periódicas das ondas marítimas, é possível expressá-la por meio de intervalos de tempo de funcionamento e interrupções, observados durante uma janela temporal, dividida em minutos, dependendo do estado do mar.

Desse modo, a disponibilidade foi calculada de duas formas. A primeira, por meio da relação entre o tempo de funcionamento do enlace ( $t_f$ ) e o tempo total de simulação  $t_T$ , ou seja,

$$\eta = t_f/t_T, \quad (3.31)$$

onde  $t_f$  é tempo no qual a potência recebida ( $P_{RX}$ ) permanece acima do nível de sensibilidade do receptor ( $S_r$ ).

A taxa de disponibilidade também pode ser expressa em termos da análise do comportamento do desalinhamento total do enlace ao longo do tempo. Nessa perspectiva, define-se como o desalinhamento máximo admitido pelo enlace ( $d_{max}$ ), o desalinhamento

$d$ , no qual a potência atinge o limiar de recepção ( $P_{RX} = S_r$ ). Baseada nesta definição, a taxa de disponibilidade é dada por

$$\eta = t(d < d_{max})/t_T. \quad (3.32)$$

Algumas análises foram realizadas com base na taxa de transmissão de dados efetiva do sistema ( $R_{bef}$ ). Essa taxa é calculada pela seguinte relação:

$$R_{bef} = \eta(R_b), \quad (3.33)$$

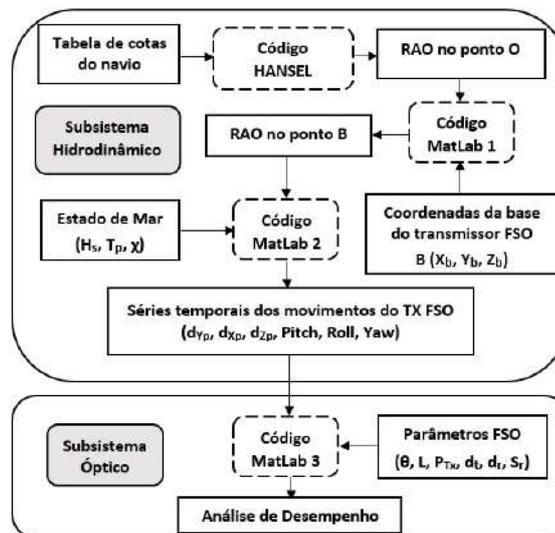
onde  $R_b$  é a taxa de transmissão de dados nominal do transceptor FSO.

## 4 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são abordados os aspectos relacionados à modelagem dos subsistemas hidrodinâmico e óptico. Inicialmente, é feita uma descrição dos subsistemas simulados e em seguida uma análise dos resultados obtidos. Por último, são apresentados os diagramas de desempenho dos sistemas FSO.

### 4.1 Descrição dos Sistemas Simulados

A fim de simplificar o entendimento da modelagem do sistema, que envolve duas áreas de conhecimento, optou-se pela divisão da análise em dois subsistemas: hidrodinâmico e óptico. O primeiro está relacionado à modelagem de todos os movimentos que alteram a posição do FSO TX. O subsistema óptico é responsável pelas simulações das características de desempenho do enlace de comunicações FSO. O fluxograma representado na Figura 4.1 contempla todas as etapas envolvidas na modelagem dos dois problemas.



**Figura 4.1** – Fluxograma da modelagem dos sistemas.

A solução do problema hidrodinâmico consiste no cálculo dos movimentos que influenciam o alinhamento do enlace FSO. Nesta modelagem, o subsistema hidrodinâmico recebe como valores de entrada os parâmetros de um determinado estado de mar e fornece como saída as séries temporais dos movimentos que atuam na base do transmissor FSO.

Dessa forma, as séries temporais dos movimentos do FSO TX são utilizadas, durante a análise da influência do modelo hidrodinâmico, no comportamento do sistema de comunicações. Basicamente, essa análise é feita, por meio da observação dos níveis da

potência óptica recebida, considerando as perdas geométricas e por desalinhamento, a atenuação atmosférica e as perdas por cintilação no enlace FSO.

## 4.2 Subsistema Hidrodinâmico

O subsistema hidrodinâmico pode ser modelado como um único bloco, que recebe como valores de entradas os parâmetros de estado de mar, altura significativa de onda ( $H_s$ ), período de pico de onda ( $T_p$ ) e ângulo de incidência de onda ( $\chi$ ); e fornece como saídas as séries temporais dos movimentos que influenciam no posicionamento do FSO TX. As entradas e saídas desse subsistema se relacionam por meio das funções de transferência (RAO) do *Mariner*. O cálculo dessas funções é descrito nas próximas subseções.

### 4.2.1 Parâmetros de Entrada

Os valores de RAO, fornecidos pelo programa HANSEL, foram utilizados no Código MatLab 1 (vide Figura 4.1), para calcular os espectros de RAO no ponto B. Para isso, as Eq. 2.11, 2.12 e 2.13 foram implementadas nesse código, para receber os valores das amplitudes e dos ângulos de fase das curvas de RAO no ponto  $O$

Essas representações foram inseridas no espectro de JONSWAP (Código MatLab 2), da Fig. 4.1. Em seguida, para obter os espectros de mar, foi utilizado o *toolbox* WAFO (BRODTKORB et al., 2000), específico para análise estatística e simulações de ondas e carregamentos aleatórios.

### 4.2.2 Funções de Transferência do Navio

Conforme mencionado, foi utilizado neste trabalho o programa HANSEL, para efetuar o cálculo das funções de transferência do *Mariner*. Esse programa foi desenvolvido em FORTRAN e as suas subrotinas foram implementadas com base na teoria potencial linear no domínio da frequência e nos princípios da teoria das faixas. Assim, é basicamente por meio dessa teoria que o programa reconhece o formato geométrico do casco do navio. Esse processo ocorre quando o HANSEL interpreta, no arquivo de configuração dos parâmetros de entrada, as informações relacionadas às seções transversais do casco da embarcação (tabela de cotas).

O arquivo de entrada do HANSEL é composto por cartões de parâmetros. Nesses cartões, são inseridos os dados relacionados à tabela de cotas, massa do navio, frequências das ondas regulares, centro de gravidade e outras configurações definidas pelo usuário. A descrição dessas configurações e dos demais parâmetros dos cartões de entrada do HANSEL são apresentadas no Apêndice A.

Para o cálculo dos valores de RAO do navio, o programa estabelece, basicamente, por meio da Eq. (2.18), uma relação entre as amplitudes das respostas dos movimentos do corpo flutuante e das ondas que nele incidem. Assim, na análise *seakeeping* desenvolvida neste trabalho, foram utilizadas 60 frequências de ondas regulares, correspondentes à faixa de  $1,999 \text{ s} < T < 28,049 \text{ s}$ .

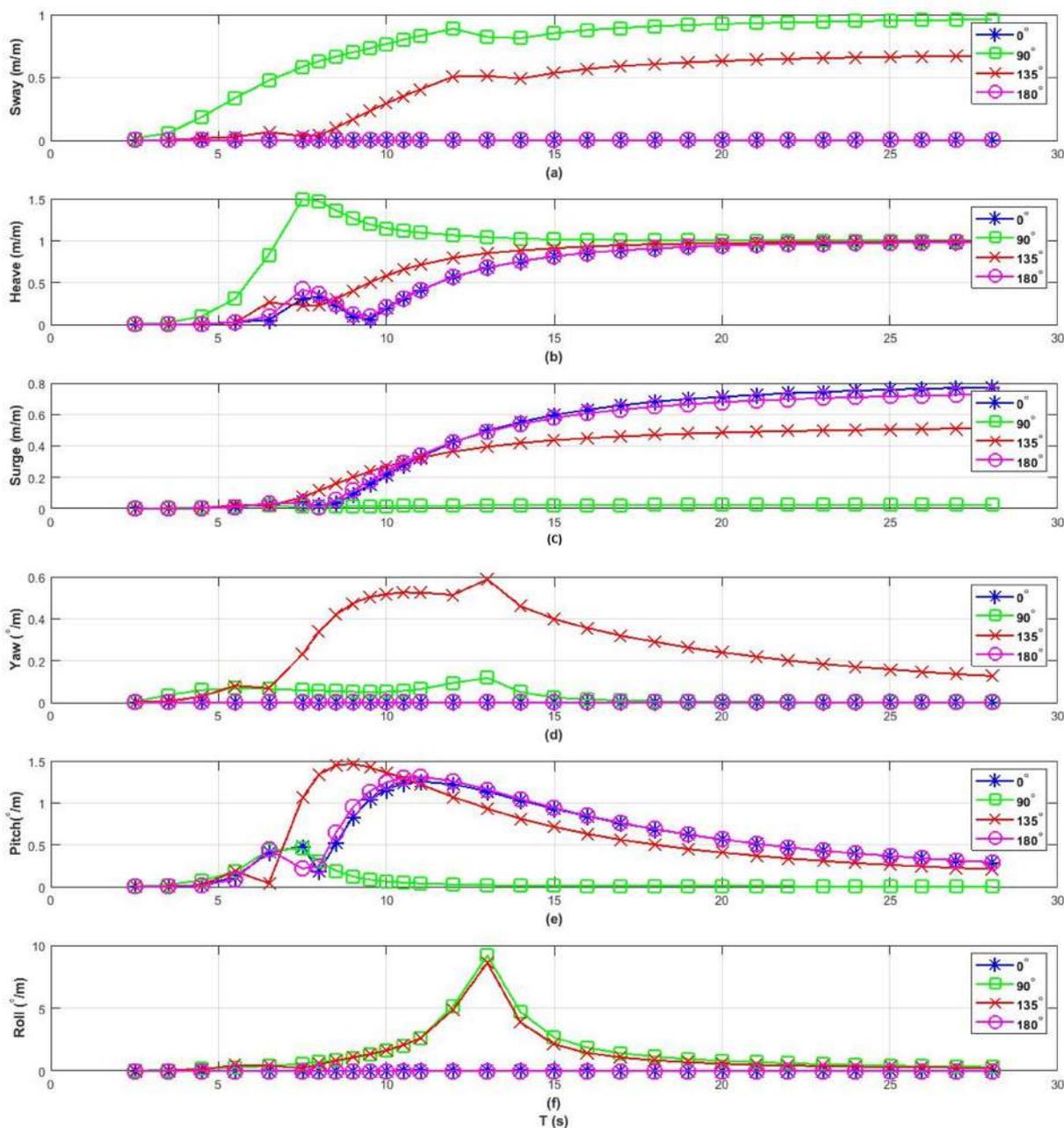
Os arquivos de dados de entrada do *Mariner* foram processados pelo programa HANSEL, para que fossem obtidos os valores das amplitudes e fases dos movimentos do navio, para todas as incidências de ondas, consideradas na análise do comportamento no mar. Com base nesses resultados, extraídos dos arquivos de saída do HANSEL, foram obtidas as curvas de RAO no ponto  $O$  do navio *Mariner*, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 4.2.

Na Figura 4.2, os gráficos mostram que as curvas de RAO dos movimentos desenvolvidos pelo navio nos seis graus de liberdade são praticamente idênticas para as incidências de onda de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Tal comportamento é justificado pelas semelhanças observadas entre as seções transversais de proa e de popa do casco do navio (vide Figura A.3).

As curvas de RAO das Figuras 4.2(a), (d) e (f) mostram que o *Mariner* não desenvolve os movimentos de deriva (*sway*), guinada (*yaw*) e balanço (*roll*) quando influenciado pelas incidências de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Esses resultados foram, também, previstos, pois essas incidências de ondas não influenciam nos movimentos transversais do navio. Em contrapartida, as curvas das Figuras 4.2(b), (c) e (e) mostram que essas incidências influenciam nos movimentos desenvolvidos na longitudinal do navio, ou seja, afundamento (*heave*), avanço (*surge*) e caturro (*pitch*). Assim, nota-se que os movimentos de *heave*, *surge* e *pitch* atingem as amplitudes máximas de  $0,983 \text{ m/m}$ ,  $0,773 \text{ m/m}$ ,  $1,256^\circ/\text{m}$  respectivamente, nos períodos de 28 s, 28 s e 11 s.

Seguindo o mesmo raciocínio, observou-se que as respostas do *Mariner*, diante da incidência de  $90^\circ$ , seguem praticamente uma lógica inversa em relação às incidências de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Nesse sentido, as curvas de RAO de avanço (*surge*) e caturro (*pitch*), para as ondas de  $90^\circ$ , mostram que essa incidência exerce pouca influência nos movimentos desenvolvidos ao longo do navio. Por outro lado, é perceptível nas curvas de RAO de deriva (*sway*), afundamento (*heave*) e balanço (*roll*), que as amplitudes desses movimentos são mais elevadas em comparação aos resultados obtidos para os mares de proa e popa. Dessa forma, os gráficos das Figuras 4.2(a), (b) e (f) mostram que esses movimentos atingem as amplitudes máximas de  $0,962 \text{ m/m}$ ,  $1,497 \text{ m/m}$ ,  $9,187^\circ/\text{m}$ , respectivamente, nos períodos de 28 s, 7,498 s e 13 s.

Comparando todas as curvas de RAO, percebe-se que o navio desenvolve, de fato, os movimentos nos seis graus de liberdade somente quando seu casco é influenciado pelas incidências oblíquas, como a de  $135^\circ$ . É também diante dessas ondas que o navio desenvolve movimentos angulares de maior amplitude. Para essa incidência ( $135^\circ$ ), o movimento de



**Figura 4.2** – Curvas de RAO no ponto  $O$  do navio *Mariner*.

guinada (*yaw*) atinge a amplitude máxima de  $0,588^\circ/\text{m}$ , em  $T = 12,49$  s.

Observa-se também que a curva de RAO de *pitch* para essa incidência é semelhante às curvas de RAO de *pitch* para as incidências de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Para as ondas de  $135^\circ$  são observadas as amplitudes máximas de movimento,  $1,465^\circ/\text{m}$  em  $T = 9$  s.

Da mesma forma, são identificadas semelhanças entre as curvas de RAO do movimento de *roll* para as ondas de  $90^\circ$  e  $135^\circ$ . Para a incidência de  $135^\circ$ , as amplitudes atingem  $9,187^\circ/\text{m}$  em  $T = 13$  s. Esse valor corresponde à máxima amplitude de movimento dos 6 graus de liberdade. Contudo, para a posição do navio, considerada neste estudo (proa voltada para praia em uma posição perpendicular à faixa costeira), a rotação de *roll*

influencia apenas nos termos  $x_p$  e  $y_p$  da Eq. 3.19.

Em contrapartida, essa mesma equação mostra que as rotações de *yaw* ( $\psi$ ) e *pitch* ( $v$ ) exercem uma grande influência no desalinhamento do feixe ( $d$ ), por meio dos termos ( $d_\psi = L \tan \psi$  e  $d_v = L \tan v$ ), respectivamente.

### 4.2.3 Parâmetros de saída

Os valores de RAO, fornecidos pelo programa HANSEL, foram utilizados no Código MatLab 1 (vide Figura 4.1), para calcular os espectros de RAO no ponto B. Para isso, as Eq. 2.11, 2.12 e 2.13 foram implementadas nesse código, para receber os valores das amplitudes e dos ângulos de fase das curvas de RAO no ponto  $O$ .

Em seguida, a Eq. 2.20 foi implementada no Código MatLab 2, com o intuito de receber os valores dos espectros de RAO no ponto B e as informações relacionadas aos espectros de mar ( $H_s, T_p, \chi$ ), para efetuar o cálculo dos espectros de resposta do *Mariner* em uma determinada condição de mar.

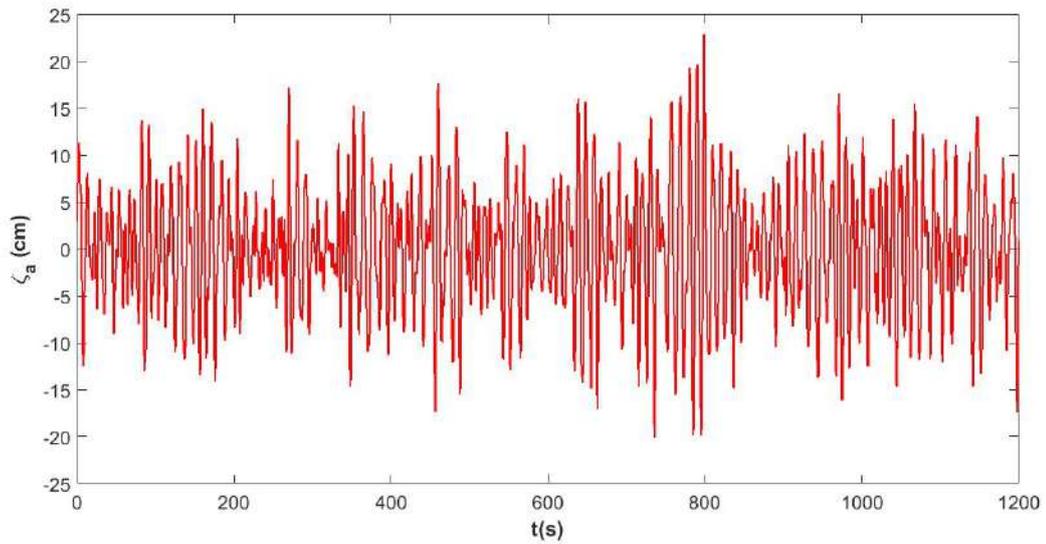
Finalmente, a fim de obter as séries temporais dos movimentos do navio no ponto  $B$  foi utilizado, novamente, o *toolbox* WAFO. Dessa forma, os seis movimentos foram calculados em uma janela temporal de 20 minutos. Devido à concisão, optou-se por apresentar os resultados para o estado do mar ( $H_s = 0,25$  m,  $T_p = 11$  s), cujo período de pico é próximo ao período onde o RAO de *pitch*, para a incidência de onda  $135^\circ$ , é máximo. Além disso, conforme descrito na subseção anterior, na incidência de  $135^\circ$  a embarcação desenvolve os movimentos em todos os seis graus de liberdade. A série temporal da elevação da onda que deu origem aos movimentos é mostrada na Figura 4.3. As séries temporais para esse estado de mar ( $H_s = 0,25$  m,  $T_p = 11$  s,  $\chi = 135^\circ$ ) são representadas na Figura 4.4.

## 4.3 Subsistema Óptico

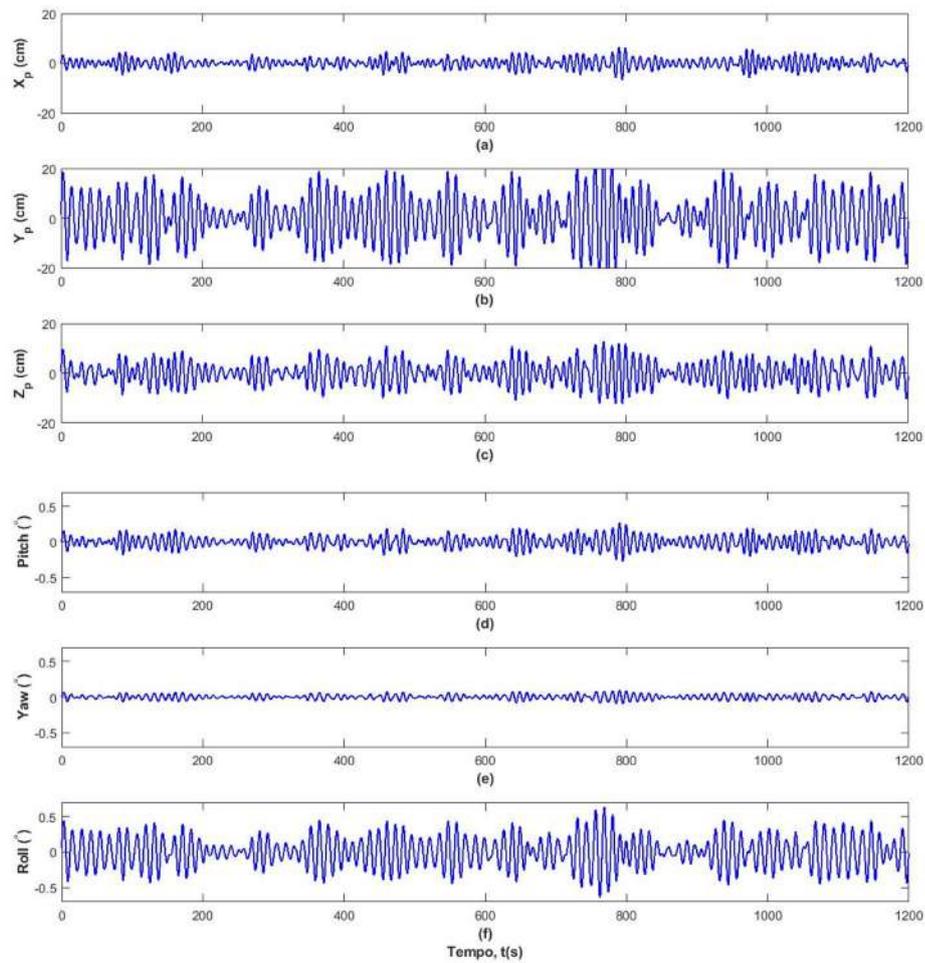
Este subsistema foi simulado considerando os parâmetros ópticos da Tabela 4.1. Esses parâmetros foram estabelecidos com base nos valores típicos de sistemas FSO (BLOOM et al., 2003; ARTOLINK, 2021) e em dados experimentais (TOUATI et al., 2016; RABINOVICH et al., 2015; KAYMAK et al., 2017).

Uma faixa operacional foi definida para o cenário descrito na Figura 1.7. Assim, o sistema FSO deve atender às faixas de comprimentos e variações nas perdas atmosféricas, especificadas na Tabela 4.1. A perda por cintilação depende da distância, é portanto, variável. O ângulo de divergência é variável, para possibilitar a análise da sua influência.

Os transceptores FSO operando sem um sistema ATP geralmente têm um ângulo de divergência de 2 a 10 mrad, para compensar os efeitos dos movimentos da plataforma.



**Figura 4.3** – Série temporal da elevação de onda para o estado de mar ( $H_s = 0,25$  m,  $T_p = 11$  s,  $\chi = 135^\circ$ ).



**Figura 4.4** – Séries temporais dos movimentos do FSO TX no ponto  $B$  para o estado de mar ( $H_s = 0,25$  m,  $T_p = 11$  s,  $\chi = 135^\circ$ ).

**Tabela 4.1** – Parâmetros do Sistema FSO.

| Parâmetro       | Descrição  | Valor        |
|-----------------|--|--------------|
| $P_{TX}$        | Potência do Laser  | 14 dBm       |
| $L$             | Comprimento do Enlace                                      | 3 – 5 km     |
| $\alpha_{atm}$  | Atenuação Atmosférica                                      | 1 – 2 dB/km  |
| $\alpha_{TX}$   | Perdas de inserção no transmissor FSO                      | 1 dB         |
| $\alpha_{RX}$   | Perdas de inserção no receptor FSO                         | 1 dB         |
| $\alpha_{cint}$ | Perdas por Cintilação                                      | 1 – 1,7 dB   |
| $d_t$           | Diâmetro da abertura do transmissor FSO                    | 5 cm         |
| $d_r$           | Diâmetro da abertura do receptor FSO                       | 20 cm        |
| $\theta$        | Ângulo de Divergência                                      | 1 – 3,5 mrad |
| $S_r$           | Sensibilidade do Receptor                                  | -36 dBm      |
| $\lambda_f$     | Comprimento de onda do feixe óptico                        | 1550 nm      |
| $\lambda_b$     | Comprimento de onda do feixe de controle ( <i>beacon</i> ) | 850 nm       |
| $R_b$           | Taxa de transmissão de dados (nominal)                     | 1 Gbps       |

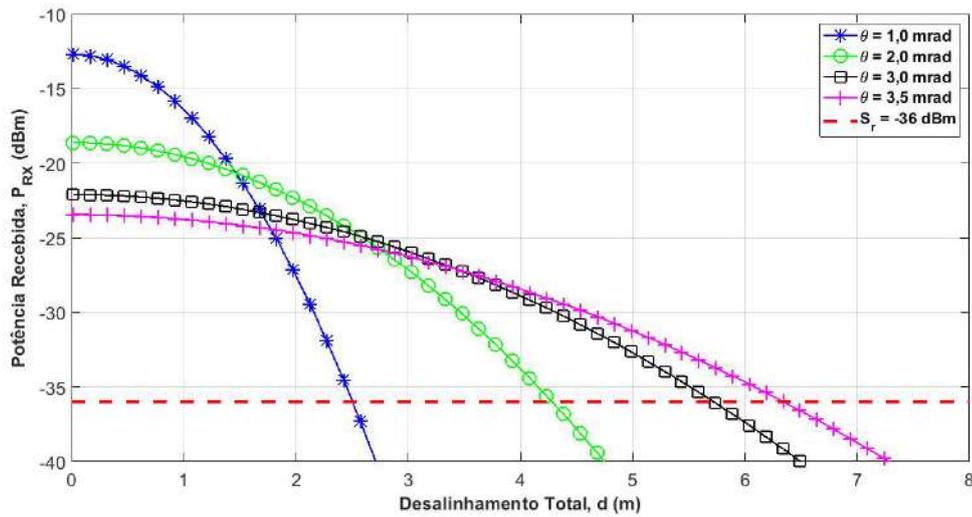
Por outro lado, sistemas FSO que possuem mecanismo ATP podem operar com ângulo de divergência mais estreito (0,05 – 1 mrad), aumentando assim o alcance do sistema (BLOOM et al., 2003). Em testes de comunicação entre navios da Marinha dos Estados Unidos, conduzidos pelo NRL, por exemplo, os transeptores FSO foram configurados com ATP e  $\theta = 1$  mrad (RABINOVICH et al., 2015). No presente estudo, propõe-se o uso de um laser CW em outro comprimento de onda ( $\lambda_b$ ), como um *beacon*, para sinalizar se o enlace está pronto para a transmissão de dados.

### 4.3.1 Análise da influência dos parâmetros do sistema FSO

#### 4.3.1.1 Análise da influência do ângulo de divergência

Inicialmente, para valores fixos,  $L = 3$  km e  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km, foram traçadas as curvas da Figura 4.5 com o propósito de avaliar o comportamento da potência recebida em função do desalinhamento total, para diferentes ângulos de divergência. No gráfico, a linha vermelha tracejada corresponde ao limiar de potência de recepção. Assim, considerando inicialmente uma condição de alinhamento perfeito entre os transeptores do enlace ( $d = 0$  m), percebe-se que a potência óptica decresce em função do aumento do ângulo de divergência. Essa redução nos níveis da potência recebida é provocada pelo aumento das perdas geométricas do enlace FSO, que crescem em função do aumento da área da seção reta do feixe transmitido no plano de recepção, que se torna cada vez maior em relação à área circular do receptor.

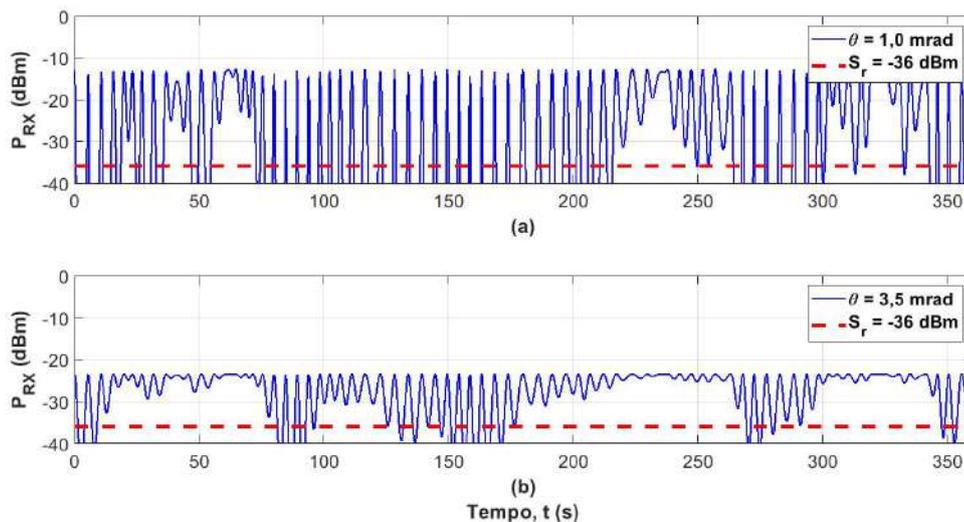
Posteriormente, observando as mesmas curvas da Figura 4.5, percebe-se que a potência decresce em função do aumento do desalinhamento total do enlace. Entretanto,



**Figura 4.5** – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes ângulos de divergência ( $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

para os sistemas FSO configurados com um ângulo de divergência maior, nota-se que a potência óptica atinge o limiar de recepção em pontos mais afastados do eixo das abscissas. Assim, é possível inferir que o aumento do parâmetro de divergência do feixe amplia a faixa de desalinhamento máximo ( $d_{max}$ ) admitido para o enlace, fazendo com que o sistema FSO seja menos sensível às variações dos movimentos do modelo hidrodinâmico.

Observou-se, também, o comportamento da potência óptica recebida ao longo do tempo em função das variações do parâmetro  $\theta$ .

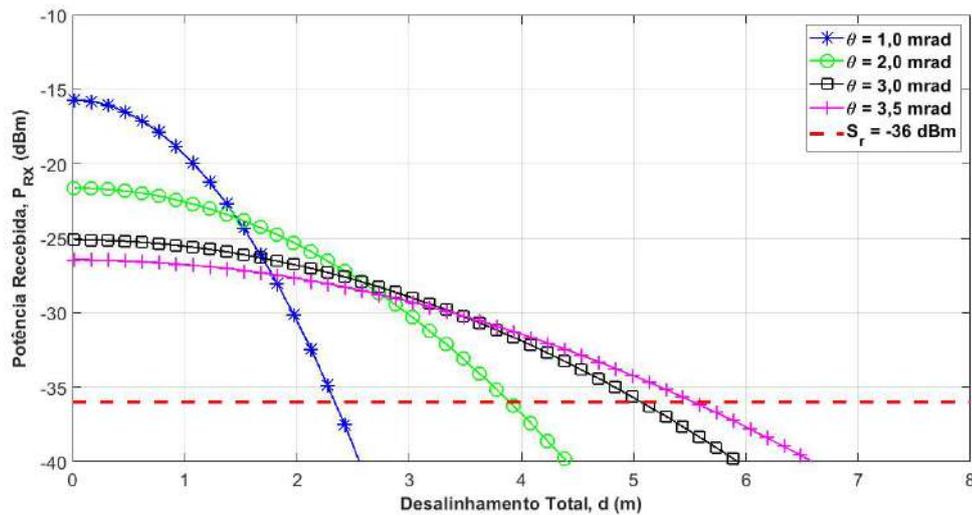


**Figura 4.6** – Potência recebida em função do tempo para diferentes ângulos de divergência ( $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

As simulações apresentadas na Figura 4.6 foram realizadas com base na influência do estado de mar descrito pelas séries temporais da Figura 4.4. Os gráficos da Figura 4.6

mostram que, para  $\theta = 1,0$  mrad, a potência atinge com maior frequência o limiar de recepção, enquanto que para  $\theta = 3,5$  mrad, as quedas de potência ocorrem com menor frequência, permanecendo acima da linha de sensibilidade do receptor em diversos intervalos de tempo.

Em seguida, foi realizada uma segunda simulação, para a mesma distância ( $L = 3$  km) e faixa de variações de ângulos de divergência, porém, considerando um aumento de 1 dB/km nas perdas atmosféricas. Os resultados são representados na Figura 4.7.



**Figura 4.7** – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes ângulos de divergência ( $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 2$  dB/km).

Em relação às curvas da Figura 4.5, observa-se que o aumento da atenuação atmosférica provocou uma redução nos valores do  $d_{max}$  em todas as configurações dos enlaces FSO. Esses valores foram consolidados na Tabela 4.2, com o propósito de estabelecer uma comparação entre os resultados.

**Tabela 4.2** – Análise da Influência dos Ângulos de Divergência.

| $\theta$ (mrad) | $d_{max1}$ (m) | $d_{max2}$ (m) |
|-----------------|----------------|----------------|
| 1,0             | 2,503          | 2,337          |
| 2,0             | 4,279          | 3,894          |
| 3,0             | 5,758          | 5,105          |
| 3,5             | 6,345          | 5,535          |

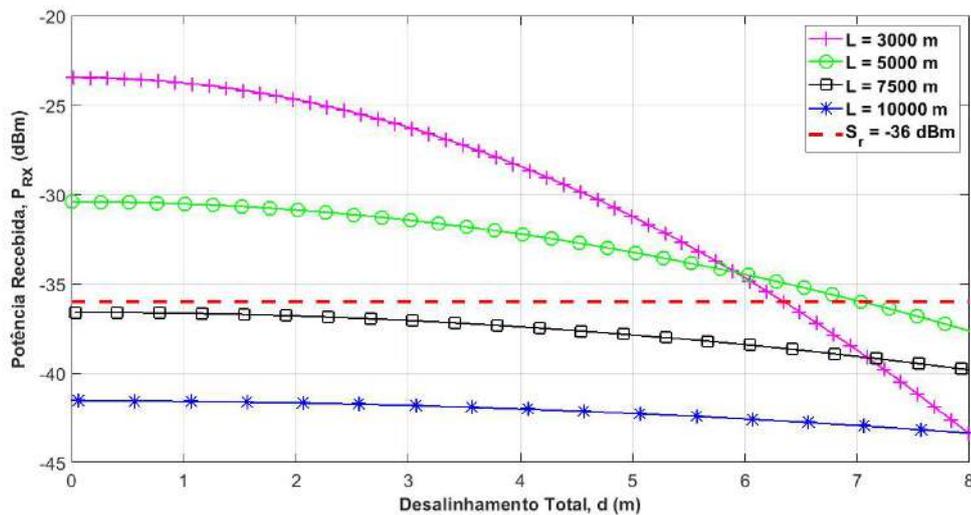
Na Tabela 4.2, as colunas relacionadas ao  $d_{max1}$  e  $d_{max2}$  representam, os valores de  $d_{max}$  para  $\alpha_{atm}$  igual a 1 dB/km e 2 dB/km, respectivamente. Uma comparação inicial entre os sistemas FSO de 1,0 mrad e 3,5 mrad, operando sob a influência de uma

atenuação atmosférica de 1 dB/km, mostra que houve um aumento de 153,5%, no valor do desalinhamento máximo admitido pelos enlaces.

Uma segunda comparação realizada entre o sistema FSO de 3,5 mrad, operando inicialmente sob a influência de  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km e, posteriormente sob a influência de  $\alpha_{atm} = 2$  dB/km, mostra que houve uma redução de 12,8% no valor do  $d_{max}$  do enlace.

#### 4.3.1.2 Análise da influência do comprimento do enlace

Em sequência, fez-se novas simulações para o sistema FSO, considerando um ângulo de divergência de 3,5 mrad e as distâncias representadas na Figura 4.8.



**Figura 4.8** – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes distâncias ( $\theta = 3,5$  mrad,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

Com base nos resultados da Figura 4.8, percebe-se que, para a distância de 3000 m, como esperado, a análise do comportamento da potência recebida em função do desalinhamento total do enlace é idêntica à descrição anterior, na Figura 4.5. Assim, percebe-se, também, que a potência óptica decresce em função do aumento do desalinhamento total e do comprimento  $L$  do enlace e essa redução de potência também é provocada pelo aumento das perdas geométricas e por desalinhamento, que crescem em função do aumento da distância entre os transceptores.

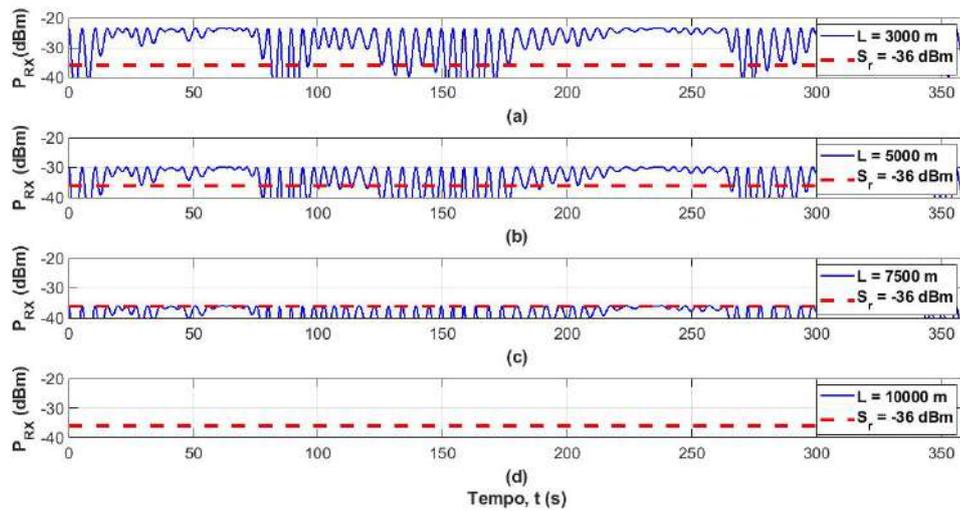
Com o aumento de 2000 m ( $L = 5$  km), a potência óptica recebida reduz 6,982 dBm, mesmo diante de uma condição de alinhamento perfeito entre o TX e RX FSO. Nesse caso, o aumento da distância  $L$  provocou um aumento nas atenuações atmosféricas (2 dB), por cintilação (0,563 dB) e nas perdas geométricas (4,419 dB), contribuindo, assim, para a redução no nível da potência captada pelo receptor ( $P_{RX} = -30,418$  dBm).

Observou-se, ainda, para esse mesmo comprimento do enlace, que a potência decresce em função do aumento dos desvios angulares e translacionais do subsistema

hidrodinâmico, atingindo o limiar de recepção em  $d_{max} = 7,034$  m.

No entanto, as simulações realizadas para os enlaces de 7500 m e 10000 m mostram que houve um aumento considerável nas perdas do sistema. Para esse sistema, a potência óptica atinge, em  $d = 0$ , respectivamente, -36,605 dBm e -41,556 dBm, comprometendo, assim, o funcionamento do enlace navio-terra.

Seguindo a mesma metodologia, fez-se também um estudo do comportamento da potência óptica em função do tempo. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.9.



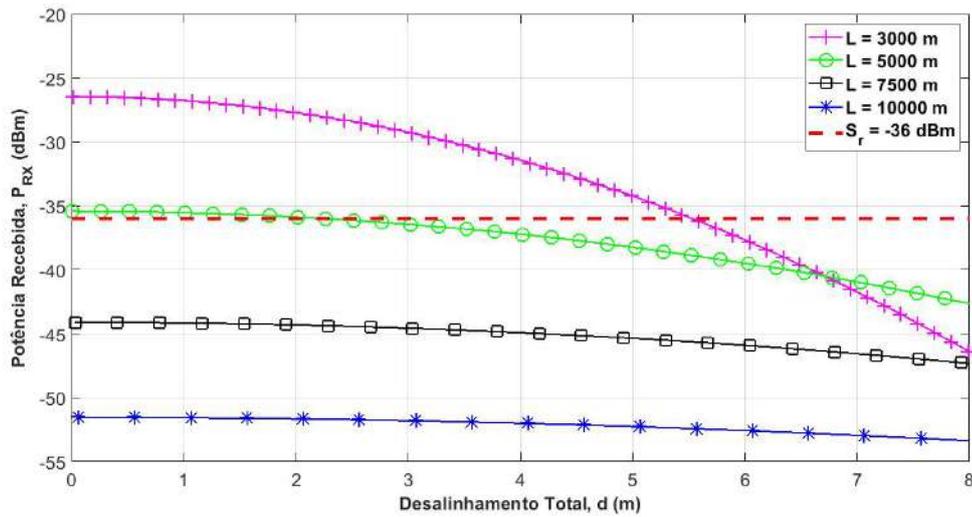
**Figura 4.9** – Potência recebida em função do tempo para diferentes distâncias ( $\theta = 3,5$  mrad,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

As simulações apresentadas na Figura 4.6 também foram realizadas com base na influência do estado de mar descrito pelas séries temporais da Figura 4.4. Assim, é possível visualizar nos gráficos das Figuras 4.9(a) e (b) algumas janelas de tempo, que possibilitam a transmissão de dados entre os terminais do sistema FSO. Por outro lado, nas Figuras 4.9(c) e (d), percebe-se que a potência óptica permanece abaixo do limiar de recepção ao longo do tempo, impossibilitando o estabelecimento de um canal de comunicações.

Finalmente, novos resultados foram gerados, com o objetivo de avaliar se o sistema FSO atenderia à faixa de atenuação atmosférica estabelecida. Os dados obtidos nessas simulações numéricas são representados na Figura 4.10.

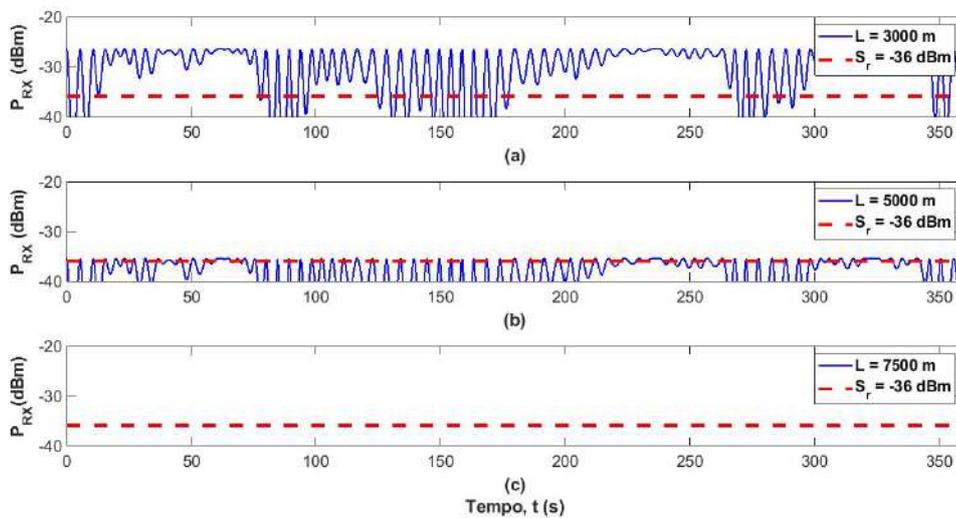
Analisando os gráficos da Figura 4.10, percebe-se que, para a distância,  $L = 3$  km, o sistema consegue captar um nível de potência máxima igual a -26,436 dBm ( $d_{max} = 5,437$  m) e para  $L = 5$  km, o sistema opera com uma potência máxima de -35,418 dBm ( $d_{max} = 2,265$  m). Para um comprimento de enlace superior a 7,5 km, a potência óptica permanece totalmente abaixo da linha de sensibilidade do receptor.

O estudo da potência recebida no domínio do tempo, realizado por meio dos gráficos da Figura 4.11, comprovam que o sistema com  $\theta = 3,5$  mrad possui capacidade



**Figura 4.10** – Potência recebida em função do desalinhamento total para diferentes distâncias ( $\theta = 3,5$  mrad,  $\alpha_{atm} = 2$  dB/km).

de transmissão de dados dentro das faixas de alcance (3 a 5 km) e atenuação atmosférica estabelecidas (1 a 2 dB/km).



**Figura 4.11** – Potência recebida em função do tempo para diferentes distâncias ( $\theta = 3,5$  mrad,  $\alpha_{atm} = 2$  dB/km).

Assim, conclui-se que apesar da redução dos níveis da potência recebida, o sistema FSO, configurado com um ângulo de divergência de 3,5 mrad, é o mais adequado para mitigar os efeitos causados pelo desalinhamento do feixe óptico, no enlace navio-terra, operando nas condições atmosféricas estabelecidas.

Nas próximas subseções é apresentado o estudo, com base no cálculo das taxas de disponibilidade do sistema FSO, operando sob a influência de um determinado estado de mar.

## 4.4 Desempenho do Sistema FSO

Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos durante a análise da influência dos parâmetros do sistema FSO, realizada com base nas taxas de disponibilidade. Esses resultados estão consolidados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Desempenho dos Sistemas FSO.

| $\theta$ (mrad) | $\eta_1$ (%) | $\eta_2$ (%) | $\eta_3$ (%) | $\eta_4$ (%) |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1,0             | 43,500       | 40,813       | 36,667       | 29,875       |
| 2,0             | 66,625       | 61,917       | 54,938       | 41,438       |
| 3,0             | 80,000       | 74,688       | 63,313       | 37,125       |
| 3,5             | 84,771       | 78,979       | 65,833       | 22,646       |

As taxas de desempenho  $\eta_1$  e  $\eta_2$  foram calculadas para  $L = 3$  km e para  $\alpha_{atm} = 1$  e 2 dB/km, respectivamente. Da mesma forma, os valores de  $\eta_3$  e  $\eta_4$  foram calculados para  $L = 5$  km e para  $\alpha_{atm} = 1$  e 2 dB/km, respectivamente. Todas as simulações foram realizadas para o estado de mar ( $H_s = 0,25$  m,  $T_p = 11$  s,  $\chi = 135^\circ$ ).

Como previsto inicialmente, os resultados representados na coluna ( $\eta_1$  e  $\eta_2$ ), da Tabela 4.3, comprovam que a eficiência do sistema cresce em função do aumento do ângulo de divergência. Esse comportamento se repete, nas duas colunas à direita, mesmo diante do aumento das perdas causadas pelo aumento do comprimento do enlace ( $L = 5000$  m) e da atenuação atmosférica ( $\alpha_{atm} = 2$  dB/km).

Entretanto, para a última coluna de resultados dessa tabela ( $L = 5000$  m e  $\alpha_{atm} = 2$  dB/km), observa-se uma redução na taxa de desempenho a partir de  $\theta = 2,0$  mrad. Nesse sentido, percebe-se posteriormente que, apesar do aumento no valor do parâmetro  $\theta$ , o sistema passa a operar com uma taxa de disponibilidade mínima ( $\eta = 22,6\%$ ). Essa queda de desempenho ocorre em função da redução no valor do  $d_{max}$ , que faz com que o sistema opere próximo ao limiar de recepção, conforme ilustrado na curva ( $L = 5$  km), da Figura 4.10.

### 4.4.1 Taxas de Disponibilidades dos Sistemas FSO

Finalmente, são apresentadas as taxas de disponibilidade dos sistemas FSO, simulados para todos os estados de mar da Tabela 2.2. Nesse sentido, seguindo o critério de desempenho, definido neste trabalho, foram calculadas as taxas de disponibilidade para todas as 312 representações de estado de mar ( $H_s, T_p, \chi$ ).

A fim de realizar comparações, são apresentados, inicialmente, na Tabela 4.4, os resultados obtidos para o sistema FSO n° 1 ( $\theta = 1,0$  mrad,  $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

**Tabela 4.4** – Diagrama de Taxas de Disponibilidades do Sistema FSO n° 1 ( $\theta = 1,0$  mrad,  $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km)

| $H_s$ (m)        | $T_p$ (s) |           |           |            |             |             |             | $H_{s_{rp}}$ (m) |
|------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
|                  | 2,0 - 4,0 | 4,0 - 6,0 | 6,0 - 8,0 | 8,0 - 10,0 | 10,0 - 12,0 | 12,0 - 14,0 | 14,0 - 16,0 |                  |
| 7,5 - 8,0        |           |           |           |            | 2,000       |             |             | 7,75             |
| 7,0 - 7,5        |           |           |           |            | 2,182       | 2,302       |             | 7,25             |
| 6,5 - 7,0        |           |           |           |            | 2,401       | 2,537       |             | 6,75             |
| 6,0 - 6,5        |           |           |           | 3,141      | 2,719       | 2,891       |             | 6,25             |
| 5,5 - 6,0        |           |           |           | 3,526      | 3,136       | 3,250       | 4,490       | 5,75             |
| 5,0 - 5,5        |           |           | 3,370     | 3,880      | 3,641       | 3,698       | 5,047       | 5,25             |
| 4,5 - 5,0        |           |           | 6,250     | 4,448      | 4,235       | 4,313       | 5,844       | 4,75             |
| 4,0 - 4,5        |           |           | 7,125     | 5,224      | 4,938       | 5,115       | 6,922       | 4,25             |
| 3,5 - 4,0        |           |           | 8,110     | 6,005      | 5,885       | 6,235       | 8,255       | 3,75             |
| 3,0 - 3,5        |           | 35,167    | 9,469     | 7,094      | 7,068       | 7,630       | 9,891       | 3,25             |
| 2,5 - 3,0        |           | 41,682    | 11,422    | 8,547      | 8,542       | 9,531       | 12,047      | 2,75             |
| 2,0 - 2,5        |           | 50,156    | 14,443    | 10,688     | 10,792      | 12,078      | 15,047      | 2,25             |
| 1,5 - 2,0        | 100       | 61,761    | 18,787    | 13,948     | 14,037      | 15,839      | 19,568      | 1,75             |
| 1,0 - 1,5        | 100       | 77,255    | 26,188    | 19,578     | 19,417      | 22,417      | 26,698      | 1,25             |
| 0,5 - 1,0        | 100       | 96,866    | 42,417    | 31,584     | 30,599      | 33,693      | 37,938      | 0,75             |
| 0,0 - 0,5        | 100       | 100       | 88,860    | 69,438     | 59,849      | 61,328      | 65,953      | 0,25             |
| $T_{p_{rp}}$ (s) | 3         | 5         | 7         | 9          | 11          | 13          | 15          | -                |

Na Tabela 4.4, cada célula representa a média entre as taxas de disponibilidade calculadas para cada uma das incidências de ondas. Essa tabela mostra que as ondas oceânicas de maior amplitude fazem com que o sistema FSO n° 1 opere com taxas de disponibilidade mais baixas. Mostra também que o menor desempenho ocorre no período de pico de 11 s, indicando um estado de ressonância do *Mariner*.

Seguindo o mesmo procedimento, foram calculadas as taxas de desempenho para o sistema FSO n° 2 ( $\theta = 3,5$  mrad,  $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km). Os resultados estão consolidados na Tabela 4.5.

Os resultados mostram que o sistema FSO n° 2 opera com taxas de disponibilidades mais altas em comparação ao sistema n° 1. Esse resultado foi previsto inicialmente, bem como o comportamento idêntico ao do sistema n° 1, diante do período de pico de 11 s e das ondas de maior amplitude.

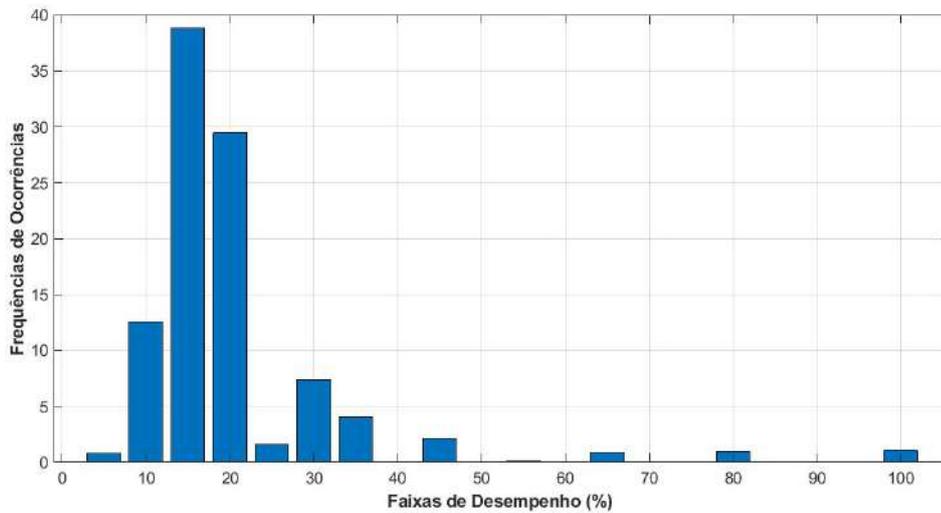
Em seguida, fez-se uma análise do desempenho dos sistemas, com base nos histogramas de faixas de disponibilidade. A Figura 4.12 apresenta o histograma de faixas de disponibilidade para o sistema FSO n° 1.

No eixo horizontal foram estabelecidos intervalos de desempenho, com espaçamento de 5%, e no eixo eixo vertical a frequência de ocorrência das taxas de disponibilidades. Esse histograma mostra que as taxas de disponibilidade abaixo de 50% ocorreram com maior frequência (96,98%) em relação à faixa superior a 50% (3,02%).

Seguindo a mesma metodologia, obteve-se o histograma de faixas de disponibilidade

**Tabela 4.5** – Diagrama de Taxas de Disponibilidades do Sistema FSO n° 2 ( $\theta = 3,5$  mrad,  $L = 3$  km,  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km)

| $H_s$ (m)      | $T_p$ (s) |           |           |            |             |             |             | $H_{s,rp}$ (m) |
|----------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
|                | 2,0 - 4,0 | 4,0 - 6,0 | 6,0 - 8,0 | 8,0 - 10,0 | 10,0 - 12,0 | 12,0 - 14,0 | 14,0 - 16,0 |                |
| 7,5 - 8,0      |           |           |           |            | 7,589       |             |             | 7,75           |
| 7,0 - 7,5      |           |           |           |            | 8,325       | 9,151       |             | 7,25           |
| 6,5 - 7,0      |           |           |           |            | 8,907       | 9,880       |             | 6,75           |
| 6,0 - 6,5      |           |           |           | 9,703      | 9,719       | 10,844      |             | 6,25           |
| 5,5 - 6,0      |           |           |           | 10,604     | 10,714      | 11,948      | 14,896      | 5,75           |
| 5,0 - 5,5      |           |           | 15,855    | 11,714     | 11,750      | 13,219      | 16,474      | 5,25           |
| 4,5 - 5,0      |           |           | 17,625    | 13,787     | 12,943      | 14,761      | 18,302      | 4,75           |
| 4,0 - 4,5      |           |           | 19,740    | 14,579     | 14,625      | 16,656      | 20,427      | 4,25           |
| 3,5 - 4,0      |           |           | 22,250    | 16,589     | 16,547      | 18,870      | 23,073      | 3,75           |
| 3,0 - 3,5      |           | 76,042    | 25,484    | 19,110     | 18,990      | 21,792      | 26,130      | 3,25           |
| 2,5 - 3,0      |           | 83,354    | 29,964    | 22,209     | 22,266      | 25,370      | 30,120      | 2,75           |
| 2,0 - 2,5      |           | 88,110    | 36,073    | 26,985     | 26,526      | 29,969      | 34,360      | 2,25           |
| 1,5 - 2,0      | 100       | 96,391    | 45,724    | 33,682     | 32,637      | 35,688      | 39,557      | 1,75           |
| 1,0 - 1,5      | 100       | 99,271    | 60,021    | 44,526     | 40,984      | 43,568      | 46,122      | 1,25           |
| 0,5 - 1,0      | 100       | 100       | 83,219    | 63,407     | 54,943      | 56,119      | 60,141      | 0,75           |
| 0,0 - 0,5      | 100       | 100       | 99,719    | 95,891     | 91,624      | 92,391      | 95,542      | 0,25           |
| $T_{p,rp}$ (s) | 3         | 5         | 7         | 9          | 11          | 13          | 15          | -              |

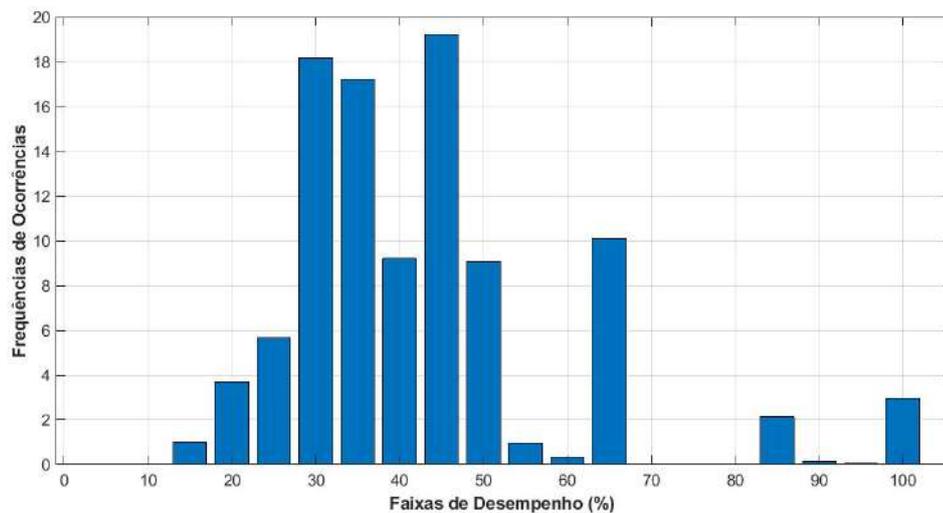


**Figura 4.12** – Histograma de faixas de disponibilidade para o sistema FSO n° 1.

da Figura 4.13, para o sistema FSO n° 2.

A análise dos resultados para o sistema FSO n° 2 mostra que as taxas de disponibilidade abaixo de 50% ocorreram com maior frequência (74,26%) em relação à faixa superior a 50% (25,74%), porém, houve uma melhora em relação ao sistema n° 1.

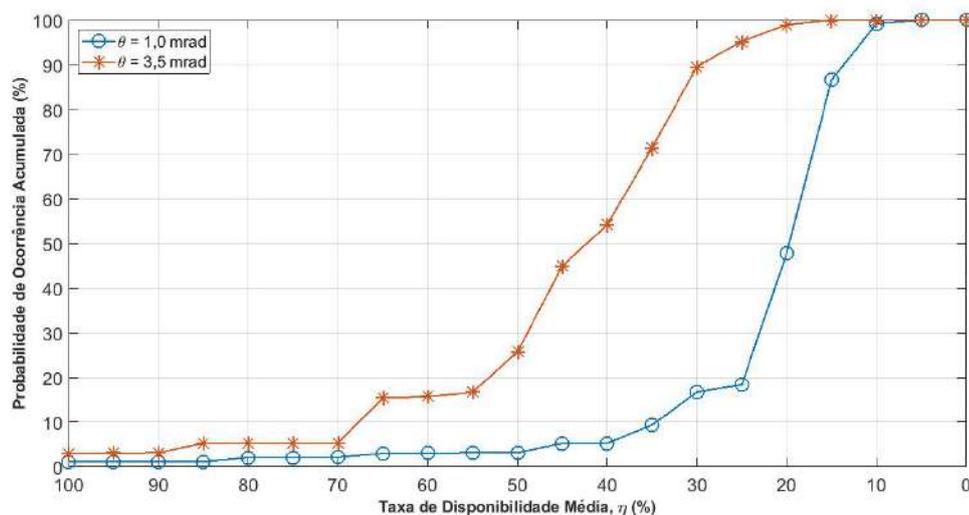
Em termos de taxa de transmissão de dados efetiva ( $R_{bef} = (0,5) \cdot 1$  Gbps = 500 Mbps), percebe-se que os sistemas n° 1 e n° 2 possuem, respectivamente, uma probabilidade de 3,02% e 25,74% de operar com taxas de transmissão acima de 500 Mbps. Esse controle da



**Figura 4.13** – Histograma de faixas de disponibilidade para o sistema FSO nº 2.

taxa de transmissão de dados é feito por meio do feixe *beacon*, da Figura 3.4, com base na observação dos níveis da potência óptica recebida em função do tempo.

Para estimar a taxa de dados, considerando as condições aleatórias do mar, dividiu-se as taxas de disponibilidade das Tabelas 4.4 e 4.5 em intervalos de 5% e a probabilidade de ocorrência de cada intervalo foi calculado com base na Tabela 2.2. A Fig. 4.14 mostra a probabilidade cumulativa de ocorrência para cada faixa de taxa de disponibilidade. O eixo da taxa de disponibilidade foi invertido propositalmente para mostrar primeiro a probabilidade de altas taxas de dados.



**Figura 4.14** – Probabilidade cumulativa de ocorrência para cada faixa de taxa de disponibilidade ( $L = 3\text{km}$  e  $\alpha_{atm} = 1 \text{ dB/km}$ ).

As curvas mostram que o sistema tem baixa probabilidade de operar com uma disponibilidade acima de 70% (5,3%, para 3,5 mrad, e 2,1%, para 1 mrad). Esta disponibi-

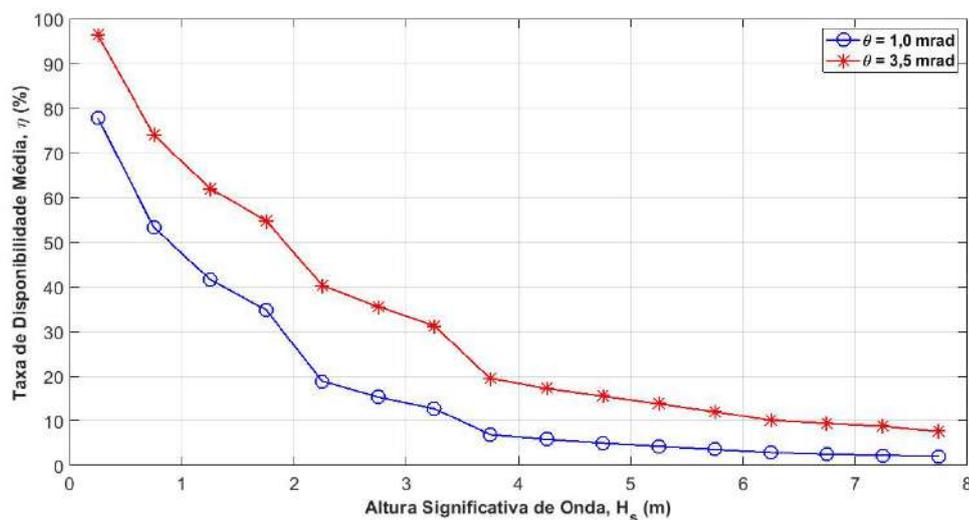
lidade corresponde a uma taxa efetiva de dados de 700 Mbps. Posteriormente, observa-se que a probabilidade do sistema operar acima de 500 Mbps aumenta para 25,8%, para 3,5 mrad, mas permanece praticamente inalterada (3,2%) para 1 mrad. Por fim, com 90% de confiança, o sistema opera a uma taxa efetiva de 300 Mbps e 136,6 Mbps, para cada um dos ângulos de divergência analisados.

## 4.5 Análise da Influência dos Estados de Mar

As taxas de disponibilidade do sistema FSO ( $\theta = 3,5$  mrad) são utilizadas no estudo da influência dos parâmetros de estado de mar no enlace navio-terra. Fez-se inicialmente uma análise da influência das alturas de onda.

### 4.5.1 Altura Significativa de Ondas

As taxas de disponibilidade média, para cada  $H_{srp}$  do diagrama de dispersão (Tabela 2.2), são representadas no eixo vertical da Figura 4.15, possibilitando uma visualização do seu comportamento em função das variações desse parâmetro de estado de mar.

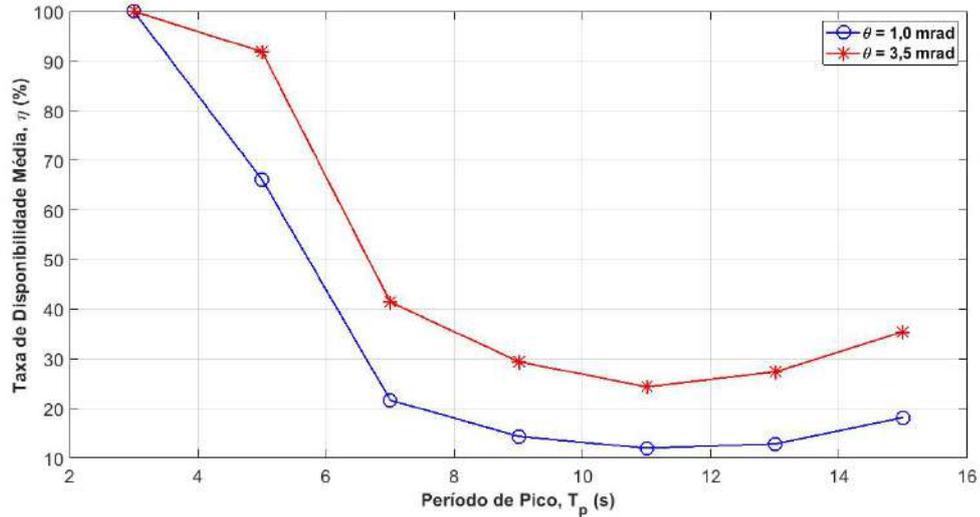


**Figura 4.15** – Taxa de Disponibilidade Média em função da Altura Significativa de Onda ( $L = 3$  km e  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

Assim, é possível perceber, por meio da análise da Figura 4.15, que o sistema FSO perde a sua eficiência diante do aumento das alturas significativas de mar. Nessa perspectiva, observa-se que para os valores representativos de  $H_s$ , iguais a 0,25 m e 7,75 m, o sistema opera, respectivamente, com as taxas de disponibilidade de 96,5% e 7,6%, para  $\theta = 3,5$  mrad e 77,92% e 2%, para  $\theta = 1,0$  mrad. Essa queda de desempenho ocorre em função do aumento das perdas geométricas e por desalinhamento, que crescem, em função do aumento das amplitudes das ondas oceânicas.

### 4.5.2 Período de Pico

Seguindo o mesmo raciocínio da análise anterior, fez-se, também, o cálculo das taxas de efetividade média do sistema, para os valores representativos de  $T_{pp}$ . Esses resultados são apresentados na Figura 4.16.



**Figura 4.16** – Taxa de Disponibilidade Média em função do Período de Pico ( $L = 3$  km e  $\alpha_{atm} = 1$  dB/km).

Assim, percebe-se, na Figura 4.16, que o sistema FSO opera inicialmente com a máxima eficiência ( $\eta = 100\%$ ) no período de pico de 3 s. Posteriormente, a taxa de desempenho reduz abruptamente, atingindo, o valor mínimo ( $\eta = 11,96\%$ , para  $\theta = 1,0$  mrad) e ( $\eta = 24,3\%$ , para  $\theta = 3,5$  mrad) quando  $T_p = 11$  s. No entanto, após esse período de pico, a taxa de efetividade sofre um ligeiro aumento e atinge  $18,14\%$  e  $35,4\%$ , respectivamente, para os sistemas n° 1 e n° 2, no  $T_p = 15$  s.

O baixo desempenho no período de pico de 11 s é uma consequência dos efeitos dos períodos de ressonância observados nas curvas de RAO dos movimentos angulares de *pitch* e *yaw* para as incidências de ondas de  $135^\circ$  (Figuras 4.2(d) e 4.2(e)). Nessas curvas, após esse período, percebe-se um ligeiro aumento nas amplitudes da rotação de *yaw* e uma redução na influência do movimento de *pitch*. No entanto, após atingir a amplitude máxima em  $T = 13$  s, a rotação de *yaw* reduz, exercendo uma menor influência no desalinhamento do enlace e provocando um ligeiro aumento na taxa de disponibilidade.

Com base nessa análise, percebe-se que o sistema FSO opera praticamente em função da influência dos movimentos que exercem maior influência no desalinhamento do enlace. Esses impactos são percebidos em termos dos desalinhamentos angulares  $d_\psi$  e  $d_v$ , que compõem o desalinhamento total do feixe (Eq. 3.19) na distância  $z = L$ .

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho fez-se uma análise do impacto do fenômeno hidrodinâmico sobre o desempenho de um sistema de comunicações FSO. Para que esse objetivo fosse alcançado, foram calculadas as perdas geométricas e por desalinhamento do enlace, provocadas pelos movimentos desenvolvidos pelo navio em seis graus de liberdade. Na modelagem proposta, optou-se pela utilização do feixe óptico circular, com distribuição Gaussiana de potência. Para avaliação do modelo foi utilizada a taxa de disponibilidade, que indica de forma direta a efetividade do sistema diante dos fenômenos considerados.

Inicialmente, foi feito o estudo do fenômeno hidrodinâmico, o que inclui a caracterização da plataforma marítima e como esta é afetada pelas ondas oceânicas. Para isto, a superfície aleatória do mar foi representada pelo espectro de JONSWAP e pelos pares  $(H_s, T_p)$  do diagrama de dispersão de estado de mar. Fez-se representar as características do navio por meio de suas funções de transferências, calculadas por uma ferramenta computacional, que se baseia nos princípios da teoria potencial linear no domínio da frequência. Obteve-se, assim, as representações temporais dos movimentos de translação e rotação da base do transmissor FSO.

Para estimar as perdas geométricas e por desalinhamento, foi utilizada a função Q de Marcum, como solução analítica, para o cálculo da potência óptica recebida de um feixe Gaussiano desalinhado. A metodologia considera que os movimentos translacionais e rotacionais do navio provocam desvios radiais no feixe óptico transmitido. Dessa forma, os movimentos angulares que influenciam no desalinhamento do feixe óptico (*yaw* e *pitch*) foram considerados como desvios radiais no eixo x e y, respectivamente, durante as análises.

As simulações realizadas em MatLab comprovaram a eficiência dessa solução analítica. A utilização dessa metodologia reduziu, consideravelmente, o tempo demandado para o cálculo da potência óptica, em comparação ao método de integração numérica da função Gaussiana. Dessa forma, essa eficiência foi considerada como um fator preponderante, durante a modelagem do enlace FSO navio-terra e possibilitou o desenvolvimento da análise de desempenho do sistema para 312 ocorrências de estado mar.

Com relação à análise da influência dos parâmetros de estado de mar, este estudo identificou que o sistema FSO, com  $\theta = 3,5$  mrad, opera com a maior taxa de disponibilidade ( $\eta = 100\%$ ) quando influenciado pelo estado de mar ( $H_s = 0,25$  m,  $T_p = 3$  s). Mostrou, também, que para  $H_s = 7,75$  m e  $T_p = 11$  s, esse mesmo sistema opera com a menor disponibilidade ( $\eta = 7,6\%$ ). Esses resultados mostraram que a taxa de efetividade do sistema reduz em função do aumento da altura significativa de onda e da proximidade da região de ressonância do navio.

O baixo desempenho do sistema observado, para os  $T_p = 11$  s, é justificado com base na análise das curvas de RAO do navio, para as ondas de  $135^\circ$ . É diante dessa incidência que a embarcação desenvolve simultaneamente os movimentos nos seis graus de liberdade. Nesse sentido, foi comprovado, para a posição do navio considerada neste estudo, que essa incidência de onda é a que mais influencia nos movimentos de *pitch* e *yaw*, e esses, por sua vez, foram os que mais afetaram o desempenho do enlace por meio dos impactos provocados no desalinhamento total do feixe transmitido. É por esse motivo que as variações nas taxas de desempenho em função dos períodos de pico seguem basicamente o comportamento das curvas de RAO desses dois movimentos.

Conclui-se, assim, com base nos diagramas de taxas de disponibilidade, que o sistema FSO com um ângulo de divergência de 3,5 mrad atende aos requisitos operacionais estabelecidos. A análise da influência do parâmetro de divergência mostra que esse sistema opera com um desalinhamento máximo de 6,345 m em um enlace de 3 km, sob a influência de atenuação atmosférica de 1 dB/km. Nesse sentido, quando o desalinhamento do feixe for menor do que esse valor de  $d_{max}$ , o feixe de controle (*beacon*) do transmissor FSO é capaz de sinalizar para o receptor que o enlace está pronto para a transmissão de dados. Assim, esse sistema de controle impede que uma transmissão de dados seja realizada quando  $d > 6,345$  m, evitando a perda de pacotes de dados e as solicitações de retransmissão, reduzindo, assim o número de bits de controle do canal (*overhead*).

Percebe-se que o funcionamento do mecanismo de controle descrito acima é baseado no parâmetro de desalinhamento do feixe óptico e este, por sua vez, é diretamente influenciado pelas ondas oceânicas que incidem no casco do navio. Para desenvolver uma análise quantitativa desse parâmetro, fez-se um estudo do comportamento do sistema FSO, a bordo de um navio militar.

Dessa forma, este trabalho proporcionou uma boa compreensão da influência do fenômeno hidrodinâmico em um sistema FSO e mostrou, de forma simplificada, como seria implementado um sistema de controle de taxa da transmissão de dados. A fim de incrementar a modelagem do sistema, sugere-se, que seja dada continuidade a este estudo, considerando as seguintes abordagens:

- análise de desempenho do sistema FSO, considerando a influência dos efeitos não lineares do sistema marítimo e uma velocidade de avanço diferente de zero;
- análise de desempenho do sistema FSO instalado em outros pontos do casco do navio;
- análise de desempenho do sistema FSO, considerando a influência dos ventos e trepidações nas bases dos transceptores FSO causadas pela expansão térmica dos sistemas de fixação;

- análise de desempenho de um enlace FSO estabelecido entre dois navios, considerando a influência do desalinhamento do feixe óptico causado pelos movimentos das duas plataformas marítimas;
- análise de desempenho do sistema FSO, considerando as perdas por cintilação e a atenuação atmosférica no enlace causadas pela propagação do feixe óptico sob a superfície de águas oceânicas em diversas regiões de operação do navio;
- estudo de viabilidade de implementação de sistemas FSO em plataformas marítimas, para medições de movimentos do sistema flutuante *seakeeping*;
- implementação de um sistema FSO em um modelo hidrodinâmico ou embarcação, com o objetivo de validar a metodologia desenvolvida;
- análise espectral do desempenho do sistema FSO; e
- análise do desempenho do sistema FSO com ATP.

## REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P. *Fiber Optic Communications Systems*. Third edit. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002. 0–471 p. ISBN 0471221147.

ANDREWS, L. C.; PHILLIPS, R. L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. 2nd. ed. [S.l.]: SPIE Publications, 2005. 820 p. ISBN 0819459488.

ARNON, S. *Optical Wireless Communications*. [S.l.]: Encyclopedia of Optical Engineering. Beer-Sheva: Ben-Gurion University of Negev, 2003. 1866 p.

ARTOLINK. *FSO Equipment M1-GE-T (User's Guide)*. 2021. Disponível em: <[http://artolink.com/page/products/free\\_space\\_optics\\_Artolink\\_1Gbps/](http://artolink.com/page/products/free_space_optics_Artolink_1Gbps/)>. Acesso em: 19 jun. 2021.

AZZOLIN, C. P.; GURGEL, A. F.; CARNEIRO, V. G. A. Marcum Q-function as an analytical solution for misaligned Gaussian beams. *Optical Engineering*, SPIE, v. 60, n. 5, p. 1 – 10, 2021.

BAI, Y.; JIN, W. L. *Marine Structural Design*. 2. ed. Waltham: Elsevier Ltd, 2016. 80 p. ISBN 9780080999975.

BLOOM, S.; KOREVAAR, E.; SCHUSTER, J.; WILLEBRAND, H. Understanding the performance of free-space optics [Invited]. *Journal of Optical Networking*, v. 2, n. 6, p. 178, jun 2003. ISSN 1536-5379. [doi:10.1364/JON.2.000178].

BOUCHET, O.; SIZUN, H.; BOISROBERT, C.; FORNEL, F. D.; Pierre-Noël Favennec. *Free-Space Optics propagation an communication*. [S.l.]: ISTE Ltd, 2006. 220 p. ISBN 1-905209-02-9.

BRODTKORB, P.; JOHANNESSEN, P.; LINDGREN, G.; RYCHLIK, I.; RYDÉN, J.; SJÖ, E. WAFO - a Matlab toolbox for the analysis of random waves and loads. In: *Proc. 10'th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Seattle, USA*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 3, p. 343–350.

CARBONNEAU, T. H.; WISELY, D. R. Opportunities and challenges for optical wireless: the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded marketplace. In: *SPIE Conference on optical wireless communications*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 119.

CARNEIRO, V. G. A. *CDMA Óptico sobre óptica no espaço livre para comunicações móveis em sistemas de defesa*. 126 p. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2013.

CARNEIRO, V. G. A.; RODRIGUES, G. K.; GIRALDI, M. T. M. R. Performance analysis of a 2D double hard-limited OCDMA system over FSO link under strong turbulence for defense applications. In: *MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference*. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–6. ISBN 978-1-4673-1731-3.

CASTILLO, C. A. R. *Sobre a dinâmica não linear do balanço paramétrico*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

CHANDRASEKARAN, S. *Dynamic Analysis and Design of Offshore Structures*. 2<sup>a</sup>. ed. Chennai, India: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. 449 p. ISBN 9789811060885.

CHEN, M. Robust tracking control for self-balancing mobile robots using disturbance observer. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, v. 4, n. 3, p. 458–465, 2017. ISSN 23299274.

CHOWDHURY, M. Z.; HOSSAN, M. T.; ISLAM, A.; JANG, Y. M. A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 9819–9840, 2018. ISSN 2169-3536.

COLLINS, C. *Typhoon generated surface gravity waves measured by NOMAD-type buoys*. 337-337 p. Tese (Doutorado), 01 2014.

COLVERO, C. P. *Análise experimental de sistemas de comunicações ópticas no espaço livre em diferentes comprimentos de onda*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

COPPE/UFRJ. *Laboratório de Tecnologia Oceânica*. 2021. Disponível em: <<http://www.laboceano.coppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 19 Jun. 2021.

CORBBET, J.; STAFFORD. *Principles of maritime strategy*. [S.l.]: Dover Publications, 2004. ISBN 9781306355216.

CORRÊA, J. G. P. S. *Estudo dos efeitos da turbulência em um enlace FSO*. 127 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2016.

CVI Melles Griot. *Gaussian Beam Optics (Guia Técnico Online)*. 2009. Disponível em: <[www.cvimellesgriot.com/Products/Documents/TechnicalGuide/Gaussian-Beam-Optics](http://www.cvimellesgriot.com/Products/Documents/TechnicalGuide/Gaussian-Beam-Optics)>.

DANIEL, B. *C2 vs. C4ISR vs. C5ISR vs. C6ISR: What's the difference?* 2020. Disponível em: <<https://www.trentonsystems.com/blog/c2-c4isr-c5isr-c6isr-differences#>>. Acesso em: 19 jun. 2021.

DATAWELL. *Datawell Oceanographic Instruments (Directional Waverider BV)*. 2021. Disponível em: <<https://www.datawell.nl/Products/Buoys.aspx>>. Acesso em: 26 jun. 2021.

DENIS, M. S.; PIERSON, W. J. On the Motions of Ships in Confused Seas. *The Society of Naval Architecture and Maritime Engineers*, v. 61, p. 81, 1953.

DORDOVÁ, L.; WILFERT, O. Calculation and Comparison of Turbulence Attenuation by Different Methods. *Radioengineering*, v. 19, n. 1, p. 162–167, 2010.

ELSWORTH, A. T. *Electronic Warfare (Defense, Security and Strategic Series)*. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2010. 193 p. ISBN 9781607412380.

FALTISEN, O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. New York, NY: University of Cambridge, 1990. 166 p. ISBN 0521458706.

FERREIRA, R. R. *Projeção Anfíbia (Operando em Amplo Espectro)*. *Âncoras e Fuzis*, Comando do Desenvolvimento Doutrinário do Corpo de Fuzileiros Navais, Rio de Janeiro, v. 45, p. 9–15, 2014.

FONSECA, M. M. *Arte Naval*. 6<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha do Brasil, 2002. I. 935 p. ISBN 978-85-7047-1239.

GHASSEMLOOY, Z.; POPOOLA, W.; RAJBHANDARI, S. *Optical Wireless Communications (System and Channel Modelling with Matlab)*. 2<sup>a</sup>. ed. New York, NY: CRC Press, 2018. 541 p. ISBN 9781315151724.

GIANNARIS, R. J.; MOORADIAN, G. C. Shipboard electro-optic system integration. In: REFERMAT, S. (Ed.). *Shipboard electro-optic system integration*. [S.l.: s.n.], 1977. v. 103, p. 120–125. ISSN 1996756X.

GIL, A.; SEGURA, J.; TEMME, N. M. Algorithm 939: Computation of the marcum q-function. *ACM Trans. Math. Softw.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 40, n. 3, 2014. ISSN 0098-3500.

GURGEL, A. F.; AZZOLIN, C. P.; RODRÍGUEZ, C. A.; CARNEIRO, V. G. A. Estudo da Influência do Movimento de Afundamento de um Navio em um Enlace de Comunicações FSO. In: *19<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Microondas e 14<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. São Caetano do Sul: [s.n.], 2020. p. 753–757. ISBN 9786589532002.

HASSELMANN, K.; BARNETT, T.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D.; ENKE, K.; EWING, J.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MULLER, P.; OLBERS, D.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). *Deut. Hydrogr. Z.*, v. 8, p. 1–95, 01 1973.

HAYKIN, S. *Digital Communication Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 802 p. ISBN 9780471647355.

HORAK, R. *Telecommunications and Data Communications Handbook*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 832 p. ISBN 9780470396070.

ITU. *Fixed service applications using free-space optical links (ITU-R F.2106-1)*. Geneva, 2011. v. 1, 56 p.

JACOB, B. P.; BAHIENSE, R. de A.; CORREA, F. N.; JACOVAZZO, B. M. Parallel implementations of coupled formulations for the analysis of floating production systems, part i: Coupling formulations. *Ocean Engineering*, v. 55, p. 206–218, 2012. ISSN 0029-8018.

JÄHRLING, N.; SAGHAFI, S. Ultramicroscopy - a novel light sheet based imaging technique created by various research disciplines. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, v. 128, p. 352–358, 10 2011.

JOURNÉE, J.; MASSIE, W. *Offshore Hydromechanics*. [S.l.]: Delft University of Technology, 2001.

KAUSHAL, H.; JAIN, V.; KAR, S. *Free Space Optical Communication*. New Delhi: Springer India, 2017. 233 p. (Optical Networks). ISBN 978-81-322-3689-4.

KAUSHAL, H.; KADDOUM, G. Applications of Lasers for Tactical Military Operations. *IEEE Access*, v. 5, p. 20736–20753, 2017. ISSN 21693536.

KAUSHAL, H.; KADDOUM, G. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 19, n. 1, p. 57–96, 2017. ISSN 1553877X.

KAYMAK, Y.; ROJAS-CESSA, R.; FENG, J.; ANSARI, N.; ZHOU, M. On Divergence-Angle Efficiency of a Laser Beam in Free-Space Optical Communications for High-Speed Trains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 66, n. 9, p. 7677–7687, sep 2017. ISSN 00189545.

KAYMAK, Y.; ROJAS-CESSA, R.; FENG, J.; ANSARI, N.; ZHOU, M.; ZHANG, T. A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 1104–1123, 2018. ISSN 1553877X.

KHALIGHI, M. A.; UYSAL, M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 16, n. 4, p. 2231–2258, apr 2014. ISSN 1553877X.

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

KOGELNIK, H.; LI, T. Laser Beams and Resonators. *Applied Optics*, v. 5, n. 10, p. 1550, out 1966. ISSN 0003-6935. [doi:10.1364/AO.5.001550].

LEITE, C. l. d. a. A projeção Anfíbia no apoio à política: construindo parcerias no Atlântico Sul. *Âncoras e Fuzis*, v. 45, p. 16–18, 2014.

LINO, E. *Nomenclatura dos Termos Náuticos*. 2010. Disponível em: <<https://www.universodopetroleo.com.br/2011/02/nomenclatura-dos-termos-nauticos.html?m=1>>. Acesso em: 19 jun. 2021.

MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, v. 187, n. 4736, p. 493–494, aug 1960. ISSN 0028-0836.

MAJUMDAR, A. K. *Advanced Free Space Optics (FSO)*. New York, NY: Springer New York, 2015. v. 186. 408 p. ISBN 978-1-4939-0917-9.

MARINHA DO BRASIL. *EMA-305: Doutrina Militar Naval*. Brasília: Estado-Maior da Armada, 2017. 141 p.

MARINHA DO BRASIL. *Navios e barcos*. 2021. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/tradicoes-navais/conhecendo-o-navio>>. Acesso em: 21 Jun. 2021.

MEYERS, W.; SHERIDAN, D. J.; SALVESEN, N. *Manual – NSRDC Ship- Motion and Sea-Load Computer Program*. Maryland, USA: Naval Ship Research and Development Center (U.S. Navy), 1975. 137 p.

MORENO, C. A. S. *Interferência Hidrodinâmica no Comportamento em Ondas Entre Navios com Velocidade de Avanço*. 168 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

- MOURA, L. E. D. S. Estudos Teórico e Experimental da Viabilidade da Tecnologia Óptica no Espaço Livre. *Revista de Ciência e Tecnologia*, p. 25–35, jun 2004.
- MUNOZ, J. M. M. S. *Estudo de uma metodologia para o dimensionamento de um tanque de provas do tipo reboque*. 156 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- NMRI. *Global Winds and Waves*. 2006. Disponível em: <[https://www.nmri.go.jp/study/Intellectual/globus/11/32-ann10yrs-hp\\_e.html](https://www.nmri.go.jp/study/Intellectual/globus/11/32-ann10yrs-hp_e.html)>. Acesso em: 19 Jan. 2021.
- NUTTALL, A. Some Integrals Involving the QM Function. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 21, n. 1, p. 95–96, jan 1975. ISSN 0018-9448. [doi:10.1109/TIT.1975.1055327].
- OSORIO, J. A. H. *Simulação e Desenvolvimento de um Enlace de "Free - Space Optics" no Rio de Janeiro e a Relação com a ITU-T G826*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.
- OSTROWSKI, R.; STELLA, M. Sediment transport beyond the surf zone under waves and currents of the non-tidal sea: Lubiato (poland) case study. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, v. 63, 05 2016.
- PAL, V.; TRADONSKY, C.; CHRKI, R.; KAPLAN, N.; BRODSKY, A.; ATTIA, M.; DAVIDSON, N.; FRIESEM, A. A. Generating flat-top beams with extended depth of focus. *Applied Optics*, v. 57, n. 16, p. 4583, 2018. ISSN 1559-128X.
- PINHO, U.; LIU, P.; EDUARDO, C.; RIBEIRO, C. Freak waves at campos basin, brazil. *Geofizika*, v. 21, 01 2004.
- POLIAK, J. *Diffraction Effects in Transmitted Optical Beam*. Tese (Doutorado) — BRNO University of Technology, 2014.
- POLIAK, J.; PEZZEI, P.; LEITGEB, E.; WILFERT, O. Link budget for high-speed short-distance wireless optical link. In: *2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–6. ISBN 978-1-4577-1473-3.
- POLIAK, J.; PEZZEI, P.; LEITGEB, E.; WILFERT, O. Analytical expression of FSO link misalignments considering Gaussian beam. In: *Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications & 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OC&I)*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 99–104. ISBN 978-1-4673-5823-1.
- PRUDNIKOV, A. P.; BRYCHKOV, I. A.; MARICHEV, O. I.; GOULD, G. G. *Integrals and series: special functions*. Moscow: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. ISBN 2-88124-090-9.
- RABINOVICH, W. S.; MOORE, C. I.; BURRIS, H. R.; MURPHY, J. L.; SUITE, M. R.; MAHON, R.; FERRARO, M. S.; GOETZ, P. G.; THOMAS, L. M.; FONT, C.; GILBREATH, G. C.; XU, B.; BINARI, S.; HACKER, K.; REESE, S.; FREEMAN, W. T.; FRAWLEY, S.; SAINT-GEORGES, E.; UECKE, S.; SENDER, J. Free space optical communications research at the U.S. Naval Research Laboratory. In: HEMMATI, H. (Ed.). *Free-Space Laser Communication Technologies XXII*. [S.l.]: SPIE, 2010. v. 7587, p. 9 – 23.

RABINOVICH, W. S.; MOORE, C. I.; MAHON, R.; GOETZ, P. G.; BURRIS, H. R.; FERRARO, M. S.; MURPHY, J. L.; THOMAS, L. M.; GILBREATH, G. C.; VILCHECK, M.; SUITE, M. R. Free-space optical communications research and demonstrations at the US Naval Research Laboratory. *Applied Optics*, v. 54, n. 31, p. F189, 2015. ISSN 0003-6935.

RODRIGUES, G. K. *Estudo da influência atmosférica em um sistema digital com multiplexação em código*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2012.

RODRIGUES, G. K.; CARNEIRO, V. G. A.; CRUZ, A. R. da; GIRALDI, M. T. M. Evaluation of the strong turbulence impact over free-space optical links. *Optics Communications*, v. 305, p. 42–47, sep 2013. ISSN 00304018.

RODRIGUES, J. E. O. O Legado das Operações Anfíbias. *Âncoras e Fuzis*, Rio de Janeiro, v. 42, p. 7–11, ago 2011.

RONCETTI, L.; CORRÊA, F.; ALBRECHT, C.; JACOB, B. Development of operational limit diagrams for offshore lifting procedures. In: . [S.l.: s.n.], 2015. (International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 1: Offshore Technology; Offshore Geotechnics), p. V001T01A056.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics*. 1ª. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. 966 p. ISBN 0-471-83965-5.

SALVESEN, N.; TUCK, E.; FALTINSEN, O. Ship motions and sea loads. *Transactions of SNAME*, v. 78, p. 250–287, 1970.

SANCHEZ, L. J. et al. Efficiency of off-axis astronomical adaptive systems: comparison of experimental data for different astronomical sites. *Adaptive Optical Sys*, v. 4007, p. 159–165, 2000.

SANTOS, L. B. dos. *Análise de sistemas de comunicação utilizando óptica no espaço livre*. 1–135 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2008.

SHNIDMAN, D. The calculation of the probability of detection and the generalized marcum q-function. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 35, n. 2, p. 389–400, 1989.

SIEGMAN, A. E. Unstable Optical Resonators for Laser Applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 53, n. 3, p. 277–287, 1965. ISSN 15582256. [doi:10.1109/PROC.1965.3685].

SINGAL, T. *Optical Fiber Communications*. Delhi, India: Cambridge University Press, 2016. 474 p. ISBN 9781316610046.

SPUTNIK. *US Marines Test Laser Communication System to Beat Radio Jammers*. 2018. Disponível em: <<https://sputniknews.com/military/201808241067456455-USMC-Tests-Laser-Communication-System/>>. Acesso em: 19 Jun. 2021.

STERLING, C. H. *Military Communications (From Ancient Times to the 21st Century)*. Santa Barbara, California: ABC-CLIO, Inc, 2008. 607 p. ISBN 9781851097326.

TOUATI, A.; ABDAOUI, A.; TOUATI, F.; UYSAL, M.; BOUALLEGUE, A. *On the Effects of Combined Atmospheric Fading and Misalignment on the Hybrid FSO/RF Transmission*. Tese (Doutorado), 2016.

TRISNO, S. *Design and Analysis of Advanced Free Space Optical Communication Systems*. 162 p. Tese (Doutorado) — University of Maryland, 2006.

UYSAL, M.; CAPSONI, C.; GHASSEMLOOY, Z.; BOUCOUVALAS, A.; UDVARY, E. *Optical Wireless Communications (An Emerging Technology)*. Cham: Springer International Publishing, 2016. 634 p. (Signals and Communication Technology). ISBN 978-3-319-30200-3.

WMO. *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO), 1998.

YARNALL, P. R. *USNS American Mariner (T-AGM-12)*. 2019. Disponível em: <<http://www.navsource.org/archives/09/53/5312.htm>>. Acesso em: 19 jun. 2021.

ZIMMERMANN, D. C. *Influência do Bulbo no Comportamento de Mar de um Casco da Série 60 em Ondas de Proa*. 118 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

ZUBALY, R. B. *Applied Naval Architecture*. [S.l.]: Schiffer Publishing, Ltd, 2015. 468 p.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Fluid Mechanics (Fundamental and Applications)*. 4<sup>a</sup>. ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 1051 p. ISBN 9781259696534.

## APÊNDICE A – CÓDIGO HANSEL

### A.1 Configurações do Programa HANSEL

Neste apêndice são apresentadas as etapas da modelagem hidrodinâmica desenvolvida no programa HANSEL. O HANSEL utiliza a teoria de faixas (*Strip Theory*) (JOURNÉE; MASSIE, 2001), para efetuar os cálculos hidrodinâmicos. Essa teoria considera que o casco do navio é seccionado ao longo do eixo longitudinal em diversas faixas transversais. Para facilitar a compreensão das simulações realizadas nesse programa, a modelagem é dividida em duas partes: dados de entrada e dados de saída.

#### A.1.1 Dados de Entrada

Nessa etapa, os parâmetros dos cartões de entrada do navio *Mariner*, listados nas páginas 33 e 34 do manual do HANSEL (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975), são escritos em um arquivo no formato ASCII (*Mariner.inp*). Durante esse processo, são realizadas as conversões de unidades de medidas para o Sistema Internacional e em seguida todos esses parâmetros foram consolidados nos cartões de entrada (DSC) das Figuras A.1 e A.2.

Os arquivos de dados das Figuras A.1 e A.2 são utilizados nas simulações das 60 ondas regulares. O primeiro refere-se às 30 frequências iniciais ( $0,465 \text{ rad/s} \geq \omega_w \geq 0,224 \text{ rad/s}$ ) e o segundo, à faixa de ( $3,142 \text{ rad/s} \geq \omega_w \geq 0,483 \text{ rad/s}$ ), conforme ilustrado na Figura A.4. Os parâmetros desses cartões de entrada (DSC) são idênticos, exceto quanto ao cartão DSC20, onde são inseridas as configurações das faixas de frequência.

Os parâmetros são inseridos nos cartões de entrada (DSC5-DSC9; DSC15-DSC20 e DSC23-DSC26) e nas colunas (C1 a C8), observando, rigorosamente, as posições definidas na documentação do programa. Assim, inicialmente, são inseridos no cartão DSC5 os parâmetros relacionados às balizas do casco do navio, da seguinte forma:

- Coluna 1: 8 (número de pontos utilizados para discretizar cada baliza do navio);
- Coluna 2: 21 (número de balizas do casco navio);
- Coluna 3: 1 (parâmetro que desabilita a leitura dos cartões DSC10-14);
- Coluna 4: 1 (parâmetro que desabilita a leitura da massa e das inércias do navio definidas no cartão DSC9).

| C1          |          | C2       |          | C3       |         | C4     |        | C5     |         | C6      |         | C7      |         | C8      |         |  |
|-------------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| 8           |          | 21       |          | 1        |         | 1      |        |        |         |         |         |         |         | DSC 5   |         |  |
| 0.0000      | 1.0000   | 2.0000   | 3.0000   | 4.0000   | 5.0000  | 6.0000 | 7.0000 | 8.0000 | 9.0000  | 10.0000 | 11.0000 | 12.0000 | 13.0000 | 14.0000 | 15.0000 |  |
| 16.0000     | 17.0000  | 18.0000  | 19.0000  | 20.0000  |         |        |        |        |         |         |         |         |         |         | DSC 6   |  |
| 160.9000    | 23.1000  |          |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 7   |         |  |
| 1.4100      | 1.2240   | 1.2240   | 1.2970   | 1.5460   | 1.4150  | 0.9070 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -2.9720 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |  |
| 3.1510      | 2.7880   | 2.6520   | 2.5530   | 2.3940   | 2.0360  | 1.5640 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -2.9720 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |  |
| 5.1320      | 4.6610   | 4.3890   | 4.1530   | 3.6270   | 2.9430  | 2.2900 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -2.9720 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |  |
| 7.1090      | 6.6510   | 5.9890   | 5.0420   | 4.0810   | 3.3050  | 1.4660 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 8.8460      | 8.4380   | 7.7620   | 6.7100   | 5.6450   | 2.3670  | 1.1830 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 10.2060     | 9.9470   | 9.3720   | 8.3330   | 7.2540   | 3.5500  | 1.7730 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.0720     | 10.9040  | 10.5370  | 9.7800   | 8.8320   | 5.2140  | 2.6070 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.4620     | 11.4210  | 11.2530  | 10.8270  | 10.0650  | 6.6290  | 3.3140 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.4250     | 11.4250  | 11.3120  | 10.7680  | 10.1020  | 8.0340  | 4.0170 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.5340     | 11.5340  | 11.4800  | 10.9580  | 10.3600  | 8.7050  | 4.3530 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.5340     | 11.5340  | 11.2480  | 11.0170  | 10.4230  | 8.5330  | 4.2660 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.5340     | 11.5340  | 11.2670  | 10.5190  | 9.7520   | 9.7520  | 3.5140 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.5340     | 11.5340  | 10.6180  | 9.6570   | 8.7500   | 5.9170  | 2.9560 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.5250     | 11.3890  | 10.8270  | 9.5170   | 8.2290   | 4.1080  | 2.0540 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 11.2440     | 10.7500  | 9.7030   | 7.8660   | 6.4470   | 2.9060  | 1.4510 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 10.5280     | 9.6350   | 7.9570   | 5.8620   | 4.5340   | 3.7180  | 0.7250 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0670 | -9.0680 |  |
| 9.1720      | 7.8350   | 6.8010   | 5.7630   | 3.9940   | 3.0150  | 2.2760 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -2.9720 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |  |
| 7.2320      | 5.4950   | 4.3430   | 3.4460   | 2.3670   | 1.8320  | 1.4420 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -2.9720 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |  |
| 4.6740      | 2.6660   | 1.6870   | 1.2690   | 0.9750   | 0.8030  | 0.6350 | 0.0000 | 0.0000 | -1.7530 | -2.9720 | -4.1910 | -6.6290 | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |  |
| 21922.7521  | 0.001900 | 0.059400 | 0.059300 | 0.000000 | -0.9052 |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 9   |         |  |
| 19          |          |          |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         |         | DSC 15  |  |
| 30          | 2        | 4        | 1        |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 16  |         |  |
| 80          |          |          |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         |         | DSC 17  |  |
| 0.0000      | 90.0000  | 135.0000 | 180.0000 |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 18  |         |  |
| 0.0000      | 0.1000   |          |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 19  |         |  |
| 0.0388      | 0.0606   | 0.0873   | 0.1188   | 0.1552   | 0.1964  | 0.2425 | 0.2934 | 0.3492 | 0.4098  | 0.4753  | 0.5456  | 0.5826  | 0.6208  | 0.6602  | 0.7008  |  |
| 0.7427      | 0.7857   | 0.8300   | 0.8755   | 0.9221   | 0.9700  | 1.0191 | 1.0695 | 1.1210 | 1.1737  | 1.2829  | 1.3968  | 1.5157  | 1.6393  | DSC 20  |         |  |
| 40          |          |          |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         |         | DSC 23  |  |
| 1           | 2        | 2        | 2        |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 24  |         |  |
| 0.000000984 | 9.81     | 160.9    | 2        |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         | DSC 25  |         |  |
| 1           | 1        | 1        | 4        | 4        | 4       | 2      | 2      | 2      | 2       | 3       | 3       | 3       | 3       | DSC 26  |         |  |
| 3           | 3        | 3        |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         |         | DSC 26  |  |
| 1.0000      | 1.0000   | 1.0000   | 1.0000   | 1.0000   | 1.0000  | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  |  |
| 3.1943      | 2.9017   | 2.9017   | 4.1697   | 1.0000   | 1.0000  | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  |  |
| 1.0000      | 1.0000   | 1.0000   |          |          |         |        |        |        |         |         |         |         |         |         | DSC 26  |  |

Figura A.1 – Arquivo de entrada do programa HANSEL (n° 1).

Em seguida, no cartão DSC6, nas colunas (C1 a C8) define-se as posições das balizas do casco do navio seccionado longitudinalmente em 20 segmentos. No cartão DSC7, nas colunas (C1 e C2) são inseridas as informações relacionadas ao comprimento entre perpendiculares ( $L_{pp} = 160,9$  m) e à largura do navio ( $B_s = 23,1$  m), respectivamente.

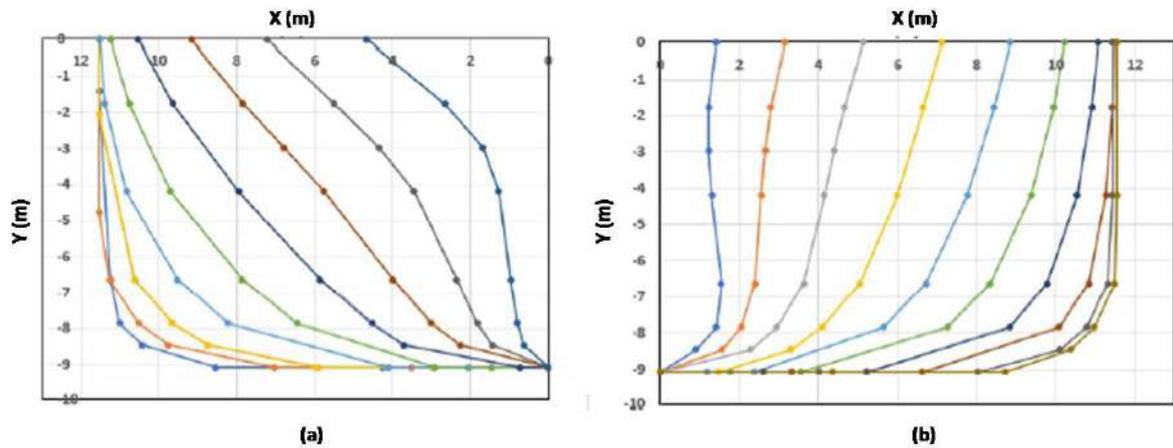
Na etapa seguinte, são inseridas as informações relacionadas à tabela de cotas. Nesse sentido, no cartão DSC8 são inseridas as coordenadas ( $X, Y$ ) dos 8 pontos utilizados

| C1         |          | C2       |          | C3       |         | C4      |         | C5     |        | C6      |         | C7      |         | C8      |         |       |
|------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 8          | 21       | 1        | 1        |          |         |         |         |        |        |         |         |         |         |         | DSC 5   |       |
| 0.0000     | 1.0000   | 2.0000   | 3.0000   | 4.0000   | 5.0000  | 6.0000  | 7.0000  | 8.0000 | 9.0000 | 10.0000 | 11.0000 | 12.0000 | 13.0000 | 14.0000 | 15.0000 | DSC 6 |
| 16.0000    | 17.0000  | 18.0000  | 19.0000  | 20.0000  |         |         |         |        |        |         |         |         |         |         | DSC 7   |       |
| 160.9000   | 23.1000  |          |          |          |         |         |         |        |        |         |         |         |         |         | DSC 8   |       |
| 1.4100     | 1.2240   | 1.2240   | 1.2970   | 1.5460   | 1.4150  | 0.9070  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -2.9720  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 3.1510     | 2.7880   | 2.6520   | 2.5530   | 2.3940   | 2.0360  | 1.5640  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -2.9720  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 5.1320     | 4.6610   | 4.3890   | 4.1530   | 3.6270   | 2.9430  | 2.2900  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -2.9720  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 7.1090     | 6.6510   | 5.9890   | 5.0420   | 4.0810   | 3.3050  | 2.4600  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 8.8460     | 8.4380   | 7.7620   | 6.7100   | 5.6450   | 4.3670  | 3.1830  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 10.2060    | 9.9470   | 9.3720   | 8.3330   | 7.2540   | 6.1500  | 5.0700  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.0720    | 10.9040  | 10.5370  | 9.7800   | 8.8320   | 7.7140  | 6.5700  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.4620    | 11.4210  | 11.2530  | 10.8270  | 10.0650  | 9.1600  | 8.1400  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.4250    | 11.4250  | 11.3120  | 10.7680  | 10.1020  | 9.3040  | 8.3970  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.5340    | 11.5340  | 11.4800  | 10.9580  | 10.3600  | 9.7050  | 9.0000  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.5340    | 11.5340  | 11.2480  | 11.0170  | 10.4230  | 9.7700  | 9.0700  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.4190  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.5340    | 11.5340  | 11.2670  | 10.5190  | 9.7520   | 8.8800  | 7.9100  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -4.7610  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.5340    | 11.5340  | 10.6180  | 9.6570   | 8.7500   | 7.7900  | 6.7800  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -2.0400  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.5250    | 11.3890  | 10.8270  | 9.5170   | 8.2290   | 6.9800  | 5.7900  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 11.2440    | 10.7500  | 9.7030   | 7.8660   | 6.4470   | 5.2000  | 4.1500  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -9.0660 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 10.5280    | 9.6350   | 7.9570   | 5.8620   | 4.5340   | 3.7180  | 3.0750  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490  | -8.4580 | -9.0670 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 9.1720     | 7.8350   | 6.8010   | 5.7630   | 4.9940   | 4.3050  | 3.7100  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -2.9720  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 7.2320     | 5.4950   | 4.3430   | 3.4460   | 2.3670   | 1.8320  | 1.4420  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -2.9720  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 4.6740     | 2.6660   | 1.6870   | 1.2690   | 0.9750   | 0.8030  | 0.6350  | 0.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | -1.7530  | -2.9720  | -4.1910  | -6.6290  | -7.8490 | -8.4580 | -9.0680 |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 21922.7521 | 0.001900 | 0.059400 | 0.059300 | 0.000000 | -0.9052 |         | DSC 9   |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 19         |          |          |          |          |         |         | DSC 15  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 30         | 2        | 4        | 1        |          |         |         | DSC 16  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 80         |          |          |          |          |         |         | DSC 17  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | 90.0000  | 135.0000 | 180.0000 |          |         |         | DSC 18  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 0.0000     | 0.1000   |          |          |          |         |         | DSC 19  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 1.7679     | 1.9013   | 2.0395   | 2.1826   | 2.3305   | 2.4833  | 2.6409  | 2.8034  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 2.9707     | 3.1429   | 3.3199   | 3.5018   | 3.6885   | 3.8801  | 4.0765  | 4.2778  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 4.4870     | 4.6949   | 4.9108   | 5.1315   | 5.3570   | 5.5874  | 5.8226  | 6.0627  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 6.3076     | 6.5574   | 6.8120   | 7.0715   | 7.3358   |         |         | DSC 20  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
|            |          |          |          |          |         |         | DSC 23  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 1          | 2        | 2        | 2        |          |         |         | DSC 24  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| .000000984 | 9.81     | 160.9    | 2        |          |         |         | DSC 25  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 1 1        | 1 4      | 4 4      | 4 4      | 2 2      | 2 2     | 3 3     | 3 3     |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 3 3        | 3        |          |          |          |         |         | DSC 26  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 1.0000     | 1.0000   | 1.0000   | 1.0000   | 1.0000   | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 3.1943     | 2.9017   | 2.9017   | 4.1697   | 1.0000   | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000  |        |        |         |         |         |         |         |         |       |
| 1.0000     | 1.0000   | 1.0000   |          |          |         |         |         |        |        |         |         |         |         |         |         |       |

Figura A.2 – Arquivo de entrada do programa HANSEL (n° 2).

para descrever cada baliza do navio. Assim, a primeira linha representa as coordenadas no eixo X e a segunda, as coordenadas no eixo Y. Esses pontos são representados no gráfico da Figura A.3.

Na Figura A.3 é possível visualizar o plano de balizas do navio Mariner. Como previsto, os gráficos obtidos são semelhantes aos perfis do navio apresentados no manual do programa (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975).



**Figura A.3** – Balizas do navio *Mariner*: (a) Seções de Popa, (b) Seções de Proa.

No cartão DSC9 são estabelecidas as seguintes configurações:

- Coluna 1:  $T_{mass} = 21922,7521$  ton (massa do navio);
- Coluna 2:  $I_{44} = 0,0019(r_{44}/L_{pp})^2$ , onde  $r_{44}$  é o raio de giro de *roll*;
- Coluna 3:  $I_{55} = 0,0594(r_{55}/L_{pp})^2$ , onde  $r_{55}$  é o raio de giro de *pitch*;
- Coluna 4:  $I_{66} = 0,0593(r_{66}/L_{pp})^2$ , onde  $r_{66}$  é o raio de giro de *yaw*;
- Coluna 5:  $I_{46} = 0,0000$ ; e
- Coluna 6:  $ZG = -0,9052$  m (posição no eixo vertical em relação ao plano de flutuação).

O parâmetro do cartão DSC15 indica a seção da última baliza onde é aplicada a correção de extremidade. Essa correção deve ser considerada em navios com extremidade de popa plana, como por exemplo, o navio *Mariner*.

O número de frequências regulares de ondas consideradas na simulação é definido no cartão DSC16, na coluna (C1). Neste mesmo cartão, o usuário define o número de velocidades de avanço do navio (1-5), número de incidências de ondas (1-10) e declividades de ondas (1-12). Neste trabalho, foram considerados os efeitos individuais de duas velocidades de avanço (C1 = 2), quatro incidências de ondas (C3 = 4) e uma declividade de onda (C4 = 1).

A declividade de onda é inserida no cartão DSC17 (C1 = 80). As incidências de ondas são definidas no cartão DSC18 (C1 =  $0^\circ$ , C2 =  $90^\circ$ , C3 =  $135^\circ$  e C4 =  $180^\circ$ ). As velocidades de avanço são definidas nas colunas (C1 = 0) e (C2 = 0,1), do cartão DSC19, por meio do Número de Froude ( $F_n = \sqrt{U/gL_{pp}}$ ) (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN,

1975). Entretanto, considerou-se apenas os resultados relacionados à velocidade de avanço nula ( $F_n = 0$ ), a fim de atender à condição de fundeio do navio.

Os parâmetros dos cartões (DSC20) dos dois arquivos de entrada representam a relação entre o comprimento de onda e o  $L_{pp}$  ( $\lambda/L_{pp}$ ) e definem as faixas de frequências das ondas. No cartão DSC21 define-se o número de frequências de encontro adimensionais ( $\omega_{EN}$ ) para cada massa adicional e para cada valor de amortecimento. Esse parâmetro é definido pela relação ( $\omega_{EN} = \omega_e \sqrt{L_{pp}/g}$  (MEYERS; SHERIDAN; SALVESEN, 1975)). No cartão DSC23 são definidas algumas configurações de cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos. Nesse sentido, por exemplo, quando a coluna (C1 = 1), o programa calcula apenas os valores de RAO dos movimentos. Pode ser configurado também para efetuar o cálculo dos carregamentos estruturais do navio induzido por ondas (momento fletor, força cortante, etc.).

No cartão (DSC24), são definidos os seguintes parâmetros:

- Coluna 1:  $\rho = 0,000000984 \text{ m}^2/\text{s}$  (viscosidade cinemática);
- Coluna 2:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  (aceleração da gravidade);
- Coluna 3:  $L_s = 160,9 \text{ m}$  (comprimento da parte submersa do casco); e
- Coluna 4: 2 (definição do tipo fluxo, 1-laminar, 2-turbulento).

Os parâmetros 1 ao 4, do cartão (DSC25) estão relacionados ao formato das balizas. Na coluna (C1), por exemplo, o parâmetro 1 significa que as balizas da seção de proa possuem um formato em "V" ou em "U". Já na coluna (C3) e (C4), o parâmetro 4 significa que as balizas do casco possuem um formato arredondo. No cartão DSC26 são definidos alguns parâmetros que fazem com que o programa estime algumas das parcelas do amortecimento viscoso do roll.

Dessa forma, o arquivo (Mariner.inp) foi executado no programa HANSEL. O programa retornou como resultado dois arquivos de dados: Eventos.dat e Mariner.out.

### A.1.2 Dados de Saída

Na parte inicial dos arquivos de saída Mariner.out são apresentados os dados que foram inseridos no arquivo de entrada do programa. Ao término dessa listagem de parâmetros ("END OF DATA CARD INPUT"), o arquivos apresentam os resultados dos cálculos de alguns parâmetros hidrodinâmicos que não foram utilizados nessa modelagem (coeficiente de massa adicional, coeficiente de amortecimento, etc.). Nestes arquivos, deve-se observar se o programa finaliza a listagem de parâmetros com o campo "END". Essa mensagem indica que o programa processou corretamente todos os parâmetros dos cartões de entrada definidos pelo usuário.

Os parâmetros utilizados na análise *seakeeping* foram extraídos do campo (*"SQUARE ROOT OF RESPONSE AMPLITUDE OPERATORS"*) dos arquivos de saída (Mariner.out), conforme ilustrado na Figura A.4. Esses valores estão relacionadas à incidência de  $0^\circ$ . Na primeira coluna desse campo de dados são apresentadas as frequências regulares ( $\omega_e$ ) utilizadas na simulação. Nas demais colunas são consolidados os valores de RAO em (m/m e  $^\circ$ /m) e seus respectivos ângulos de fase em graus. Embora conste nesse campo de informações que os valores de RAO correspondem à raiz quadrada desse parâmetro, na realidade, os dados fornecidos pelo programa já representam os valores de RAO de interesse. Esses valores de RAO foram utilizados para o traçado das curvas de RAO apresentadas na Figura 4.2.

| $\omega$  | SQUARE ROOT OF RESPONSE APLITUDE OPERATORS |              |                        |              |                        |              |                        |              |                         |              |                        |              |
|-----------|--|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|
|           | $Z_a$<br>(SURGE / R)                       | $E_{Z_a}$    | $X_a$<br>(SWAY / R)    | $E_{X_a}$    | $V_a$<br>(HEAVE / R)   | $E_{V_a}$    | $V_a$<br>(ROLL / R)    | $E_{V_a}$    | $\Phi_a$<br>(PITCH / R) | $E_{\Phi_a}$ | $\Psi_a$<br>(YAW / R)  | $E_{\Psi_a}$ |
| WE<br>RPS | AMPL. RATIO<br>SQUARED                     | PHASE<br>DEG | AMPL. RATIO<br>SQUARED | PHASE<br>DEG | AMPL. RATIO<br>SQUARED | PHASE<br>DEG | AMPL. RATIO<br>SQUARED | PHASE<br>DEG | AMPL. RATIO<br>SQUARED  | PHASE<br>DEG | AMPL. RATIO<br>SQUARED | PHASE<br>DEG |
| .224      | 7.7298E-01                                 | -97.1        | 8.2587E-08             | -89.9        | 9.8343E-01             | .2           | 2.9271E-08             | -97.8        | 2.9301E-01              | 88.7         | 2.2022E-08             | -178.8       |
| .229      | 7.7093E-01                                 | -97.2        | 8.2359E-08             | -89.9        | 9.8233E-01             | .2           | 3.0589E-08             | -98.0        | 3.0367E-01              | 88.7         | 2.2789E-08             | -178.7       |
| .233      | 7.6874E-01                                 | -97.4        | 8.2113E-08             | -89.8        | 9.8112E-01             | .3           | 3.2006E-08             | -98.3        | 3.1491E-01              | 88.8         | 2.3594E-08             | -178.7       |
| .237      | 7.6639E-01                                 | -97.5        | 8.1854E-08             | -89.8        | 9.7980E-01             | .3           | 3.3535E-08             | -98.7        | 3.2677E-01              | 88.8         | 2.4444E-08             | -178.6       |
| .242      | 7.6389E-01                                 | -97.7        | 8.1567E-08             | -89.8        | 9.7833E-01             | .3           | 3.5186E-08             | -99.0        | 3.3930E-01              | 88.8         | 2.5334E-08             | -178.5       |
| .246      | 7.6121E-01                                 | -97.9        | 8.1263E-08             | -89.8        | 9.7672E-01             | .3           | 3.6977E-08             | -99.3        | 3.5254E-01              | 88.8         | 2.6274E-08             | -178.5       |
| .251      | 7.5833E-01                                 | -98.0        | 8.0932E-08             | -89.8        | 9.7493E-01             | .4           | 3.8924E-08             | -99.7        | 3.6656E-01              | 88.8         | 2.7264E-08             | -178.4       |
| .257      | 7.5524E-01                                 | -98.2        | 8.0566E-08             | -89.8        | 9.7294E-01             | .4           | 4.1047E-08             | -100.1       | 3.8139E-01              | 88.8         | 2.8304E-08             | -178.3       |
| .262      | 7.5191E-01                                 | -98.4        | 8.0186E-08             | -89.8        | 9.7075E-01             | .4           | 4.3374E-08             | -100.5       | 3.9712E-01              | 88.8         | 2.9408E-08             | -178.2       |
| .267      | 7.4833E-01                                 | -98.6        | 7.9748E-08             | -89.8        | 9.6828E-01             | .4           | 4.5927E-08             | -101.0       | 4.1380E-01              | 88.9         | 3.0563E-08             | -178.1       |
| .273      | 7.4446E-01                                 | -98.8        | 7.9293E-08             | -89.7        | 9.6556E-01             | .5           | 4.8748E-08             | -101.4       | 4.3152E-01              | 88.9         | 3.1791E-08             | -178.0       |
| .279      | 7.4027E-01                                 | -99.0        | 7.8789E-08             | -89.7        | 9.6250E-01             | .5           | 5.1875E-08             | -101.9       | 4.5034E-01              | 88.9         | 3.3085E-08             | -177.9       |
| .286      | 7.3573E-01                                 | -99.2        | 7.8225E-08             | -89.7        | 9.5905E-01             | .6           | 5.5358E-08             | -102.4       | 4.7035E-01              | 88.9         | 3.4447E-08             | -177.8       |
| .292      | 7.3087E-01                                 | -99.5        | 7.7626E-08             | -89.7        | 9.5526E-01             | .6           | 5.9202E-08             | -102.9       | 4.9132E-01              | 88.9         | 3.5868E-08             | -177.7       |
| .299      | 7.2543E-01                                 | -99.7        | 7.6952E-08             | -89.6        | 9.5087E-01             | .7           | 6.3669E-08             | -103.5       | 5.1433E-01              | 88.9         | 3.7417E-08             | -177.6       |
| .307      | 7.1957E-01                                 | -100.0       | 7.6211E-08             | -89.6        | 9.4597E-01             | .7           | 6.8673E-08             | -104.1       | 5.3850E-01              | 89.0         | 3.9027E-08             | -177.4       |
| .314      | 7.1316E-01                                 | -100.2       | 7.5389E-08             | -89.6        | 9.4041E-01             | .8           | 7.4399E-08             | -104.8       | 5.6426E-01              | 89.0         | 4.0725E-08             | -177.3       |
| .322      | 7.0613E-01                                 | -100.5       | 7.4475E-08             | -89.5        | 9.3410E-01             | .9           | 8.1016E-08             | -105.4       | 5.9173E-01              | 89.0         | 4.2517E-08             | -177.1       |
| .331      | 6.9840E-01                                 | -100.8       | 7.3459E-08             | -89.5        | 9.2693E-01             | 1.0          | 8.8739E-08             | -106.1       | 6.2104E-01              | 89.0         | 4.4408E-08             | -176.9       |
| .340      | 6.8988E-01                                 | -101.1       | 7.2325E-08             | -89.4        | 9.1873E-01             | 1.1          | 9.7867E-08             | -106.8       | 6.5230E-01              | 89.0         | 4.6400E-08             | -176.6       |
| .349      | 6.8045E-01                                 | -101.5       | 7.1055E-08             | -89.3        | 9.0935E-01             | 1.2          | 1.0880E-07             | -107.6       | 6.8563E-01              | 89.1         | 4.8496E-08             | -176.4       |
| .359      | 6.7000E-01                                 | -101.8       | 6.9624E-08             | -89.2        | 8.9858E-01             | 1.3          | 1.2212E-07             | -108.3       | 7.2116E-01              | 89.1         | 5.0697E-08             | -176.1       |
| .370      | 6.5837E-01                                 | -102.2       | 6.8003E-08             | -89.1        | 8.8616E-01             | 1.5          | 1.3868E-07             | -109.1       | 7.5893E-01              | 89.1         | 5.3008E-08             | -175.7       |
| .381      | 6.4540E-01                                 | -102.6       | 6.6152E-08             | -88.9        | 8.7180E-01             | 1.6          | 1.5979E-07             | -109.9       | 7.9905E-01              | 89.2         | 5.5399E-08             | -175.3       |
| .393      | 6.3088E-01                                 | -103.1       | 6.4025E-08             | -88.7        | 8.5514E-01             | 1.8          | 1.8755E-07             | -110.6       | 8.4149E-01              | 89.2         | 5.7892E-08             | -174.8       |
| .405      | 6.1458E-01                                 | -103.6       | 6.1562E-08             | -88.4        | 8.3577E-01             | 2.1          | 2.2570E-07             | -111.3       | 8.8624E-01              | 89.3         | 6.0486E-08             | -174.1       |
| .419      | 5.9624E-01                                 | -104.1       | 5.8633E-08             | -87.9        | 8.1313E-01             | 2.3          | 2.8123E-07             | -111.9       | 9.3303E-01              | 89.4         | 6.3163E-08             | -173.2       |
| .433      | 5.7553E-01                                 | -104.7       | 5.5052E-08             | -87.1        | 7.8665E-01             | 2.6          | 3.6966E-07             | -112.3       | 9.8162E-01              | 89.5         | 6.5988E-08             | -172.0       |
| .449      | 5.5209E-01                                 | -105.3       | 5.0307E-08             | -85.7        | 7.5554E-01             | 3.0          | 5.3266E-07             | -112.2       | 1.0313E+00              | 89.6         | 6.9113E-08             | -170.0       |
| .465      | 5.2551E-01                                 | -106.0       | 4.2533E-08             | -81.7        | 7.1887E-01             | 3.4          | 9.3671E-07             | -110.6       | 1.0812E+00              | 89.7         | 7.3417E-08             | -165.8       |
| .483      | 4.9556E-01                                 | -106.6       | 1.1564E-08             | -28.0        | 6.7872E-01             | 4.1          | 3.4113E-06             | -93.5        | 1.1373E+00              | 89.9         | 8.6991E-08             | -141.3       |
| .503      | 4.6128E-01                                 | -107.4       | 6.2767E-08             | -103.4       | 6.2793E-01             | 4.8          | 1.7964E-06             | 51.7         | 1.1844E+00              | 90.1         | 5.9701E-08             | -169.1       |
| .524      | 4.2233E-01                                 | -108.4       | 4.6900E-08             | -94.6        | 5.6719E-01             | 5.7          | 7.1005E-07             | 58.7         | 1.2239E+00              | 90.3         | 6.6955E-08             | -178.5       |
| .546      | 3.7840E-01                                 | -109.5       | 3.8256E-08             | -92.2        | 4.9488E-01             | 6.9          | 4.2295E-07             | 60.6         | 1.2504E+00              | 90.6         | 6.7204E-08             | -174.7       |
| .571      | 3.2909E-01                                 | -110.9       | 3.0557E-08             | -91.1        | 4.0909E-01             | 8.4          | 2.8254E-07             | 61.7         | 1.2561E+00              | 90.9         | 6.4730E-08             | -172.3       |
| .585      | 3.0249E-01                                 | -111.7       | 2.6767E-08             | -90.8        | 3.6080E-01             | 9.4          | 2.3372E-07             | 62.2         | 1.2479E+00              | 91.1         | 6.2581E-08             | -171.2       |
| .598      | 2.7462E-01                                 | -112.7       | 2.2978E-08             | -90.5        | 3.0875E-01             | 10.6         | 1.9253E-07             | 62.7         | 1.2301E+00              | 91.2         | 5.9802E-08             | -170.2       |
| .613      | 2.4552E-01                                 | -113.8       | 1.9192E-08             | -90.0        | 2.5288E-01             | 12.1         | 1.5634E-07             | 63.1         | 1.2008E+00              | 91.4         | 5.6364E-08             | -169.0       |
| .628      | 2.1528E-01                                 | -115.0       | 1.5256E-08             | -90.0        | 1.9251E-01             | 14.4         | 1.2230E-07             | 63.3         | 1.1613E+00              | 91.6         | 5.1986E-08             | -167.6       |
| .645      | 1.8412E-01                                 | -116.3       | 1.1288E-08             | -90.7        | 1.2757E-01             | 18.5         | 8.9995E-08             | 62.6         | 1.1089E+00              | 91.9         | 4.6695E-08             | -166.0       |
| .661      | 1.5258E-01                                 | -118.1       | 7.5153E-09             | -92.2        | 5.9990E-02             | 29.4         | 5.9943E-08             | 60.1         | 1.0386E+00              | 92.1         | 4.0708E-08             | -164.2       |
| .679      | 1.2102E-01                                 | -120.4       | 4.0099E-09             | -96.9        | 2.3145E-02             | 144.6        | 3.2040E-08             | 51.1         | 9.4693E-01              | 92.2         | 3.4033E-08             | -162.2       |
| .698      | 9.0105E-02                                 | -123.9       | 1.0571E-09             | -130.6       | 9.0840E-02             | -174.3       | 1.2206E-08             | -6.2         | 8.3103E-01              | 92.1         | 2.6775E-08             | -159.7       |
| .718      | 6.0759E-02                                 | -129.5       | 2.0936E-09             | -114.3       | 1.6370E-01             | -166.0       | 2.7332E-08             | -77.4        | 6.8071E-01              | 91.2         | 1.9121E-08             | -156.0       |
| .739      | 3.4136E-02                                 | -141.3       | 4.1497E-09             | -103.4       | 2.3318E-01             | -160.1       | 5.0963E-08             | -88.2        | 5.1894E-01              | 88.4         | 1.1343E-08             | -148.6       |
| .762      | 1.4561E-02                                 | -176.9       | 5.5235E-09             | -99.9        | 2.9258E-01             | -153.9       | 7.3389E-08             | -90.6        | 3.3067E-01              | 78.8         | 4.3215E-09             | -120.1       |
| .786      | 1.8731E-02                                 | 97.7         | 6.0576E-09             | 97.3         | 3.3280E-01             | -146.7       | 9.3165E-08             | -90.7        | 1.8355E-01              | 38.7         | 4.8596E-09             | -17.1        |
| .811      | 3.2434E-02                                 | 73.8         | 5.6640E-09             | 94.2         | 3.4136E-01             | -138.2       | 1.0900E-07             | -89.8        | 2.7155E-01              | -18.9        | 1.0206E-08             | 4.6          |
| .838      | 4.3068E-02                                 | 62.4         | 4.2431E-09             | 88.0         | 3.0723E-01             | -126.1       | 1.1722E-07             | -87.8        | 4.8413E-01              | -31.0        | 1.3388E-08             | 13.9         |
| .898      | 4.8075E-02                                 | 47.6         | 2.0639E-09             | -3           | 1.0795E-01             | -107.9       | 1.1144E-07             | -84.1        | 6.7834E-01              | -24.0        | 1.2131E-08             | 21.8         |
| .967      | 2.8029E-02                                 | 25.5         | 4.8483E-09             | -42.2        | 5.5241E-02             | 126.2        | 7.2065E-08             | -81.9        | 4.0748E-01              | -23.9        | 9.8699E-10             | -29.1        |
| 1.047     | 1.3441E-02                                 | -62.1        | 2.4057E-09             | -43.4        | 5.9321E-02             | 101.7        | 1.5905E-08             | -96.2        | 1.4269E-01              | -88.2        | 1.0223E-08             | -138.2       |
| 1.143     | 8.1979E-03                                 | -139.4       | 2.9893E-09             | -138.8       | 2.6758E-02             | 33.2         | 1.5799E-08             | 110.4        | 1.1624E-01              | -159.8       | 2.9894E-09             | -138.4       |
| 1.257     | 8.4979E-03                                 | 94.5         | 4.2989E-10             | 90.0         | 1.0974E-02             | -68.6        | 9.1093E-09             | 28.0         | 4.3023E-02              | 86.9         | 5.9122E-09             | 53.5         |
| 1.397     | 4.4273E-03                                 | -79.7        | 2.6740E-10             | -60.4        | 6.7748E-03             | 94.9         | 1.7470E-09             | 116.5        | 1.7450E-02              | -77.0        | 3.8207E-09             | -113.2       |
| 1.571     | 1.5961E-03                                 | 92.3         | 5.7243E-10             | -8.2         | 1.7385E-03             | -172.5       | 2.5862E-09             | 34.5         | 6.6947E-03              | 59.9         | 1.7232E-09             | 70.6         |
| 1.796     | 1.2096E-03                                 | 105.3        | 2.5677E-10             | -33.6        | 9.0511E-04             | -83.7        | 2.1223E-09             | 43.3         | 3.5573E-03              | 86.7         | 1.3541E-09             | 90.0         |
| 2.095     | 4.8171E-04                                 | 57.1         | 1.4692E-10             | -155.1       | 6.5999E-04             | 105.1        | 1.2528E-09             | -90.0        | 2.2469E-03              | 85.4         | 9.1109E-10             | -90.0        |
| 2.514     | 9.3735E-04                                 | 163.1        | 8.9202E-10             | -33.4        | 6.1991E-04             | -56.6        | 6.8568E-09             | 140.7        | 3.1994E-03              | 177.1        | 1.2851E-09             | 48.6         |
| 3.142     | 1.6779E-04                                 | 159.1        | 3.8468E-10             | .8           | 8.6126E-05             | 104.0        | 2.4032E-09             | 168.9        | 4.0285E-04              | -99.0        | 1.5117E-10             | 90.0         |

Figura A.4 – Arquivo de saída do programa HANSEL.

## APÊNDICE B – FUNÇÃO Q DE MARCUM COMO SOLUÇÃO ANALÍTICA

Neste apêndice é apresentada a dedução matemática da solução analítica para feixes Gaussianos desalinhados proposta por (AZZOLIN; GURGEL; CARNEIRO, 2021). Os símbolos contidos neste apêndice obedeceram o critério da referência original e podem diferenciar do restante da dissertação. Nesse sentido, considera-se que a equação de onda em um sistema de coordenadas cilíndricas, para um feixe Gaussiano propagando-se ao longo do eixo  $z$ , assume a seguinte forma (KOGELNIK; LI, 1966):

$$U(\rho, \phi, z) = A_0 \frac{r_t}{r_L(z)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{r_L(z)^2}\right) \times \exp\left(-jkz - \frac{jk\rho^2}{2R(z)} + j\Phi\right), \quad (\text{B.1})$$

onde  $A_0$  é uma constante relacionada à potência na saída do transmissor,  $r_L(z)$  é a largura do feixe ao longo de  $z$ ,  $R(z)$  é o raio de curvatura em um ponto  $z$  e  $\Phi$  representa uma fase de retardo em relação a uma onda plana uniforme. Devido à simetria circular, não há variação ao longo da coordenada  $\phi$ .

A intensidade óptica pode ser observada por meio do perfil de irradiância, expresso pela relação  $I(\rho, z) = |U(\rho, z)|^2$ . Assim, da Eq. B.1, tem-se que:

$$I(\rho, \phi, z) = A_0^2 \frac{r_t^2}{r_L^2(z)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{r_L^2(z)}\right], \quad (\text{B.2})$$

onde  $r_L(z)$  pode ser aproximado por  $r_t + \frac{\theta z}{2}$ .

Usando a Eq. B.2 e desprezando as perdas por espalhamento e absorção, é possível determinar a potência detectada por meio da integração do perfil de irradiação sobre as superfícies do receptor. Sabe-se que a proporção entre a potência recebida e a potência total transmitida, no plano receptor, é geralmente conhecida como perda geométrica. Ao considerar os feixes Gaussianos, para um receptor circular com raio  $r_r$ , alinhado com o transmissor, a atenuação geométrica tem uma solução na forma fechada dada por (POLIAK et al., 2013),

$$\alpha_{geo} = \frac{\int_S I(x, y, z = L) ds}{\iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z = 0) dx dy} = 1 - \exp\left(-\frac{r_r^2}{r_L^2(L)}\right), \quad (\text{B.3})$$

onde  $S$  é a área da abertura do receptor.

A inclusão do efeito do desalinhamento radial no modelo é feita por meio da translação dos eixos sobre a Eq. B.2. Uma translação de eixo é simplificada realizada, usando um sistema coordenadas retangulares. Assim, considera-se que o pico do feixe

Gaussiano é posicionado nas coordenadas  $x_d$  e  $y_d$ , enquanto o centro do receptor é fixado na origem do sistema de coordenadas. Agora, a potência do feixe desalinhado, detectada no plano receptor, pode ser escrita no sistema de coordenadas retangulares da seguinte forma:

$$P_{RX}(z = L) = \int_S A_0^2 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp \left[ -\frac{2[(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2]}{r_L^2} \right] dS, \quad (\text{B.4})$$

onde o  $x_d$  e o  $y_d$  são os desalinhamentos radiais nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Reescrevendo a Eq. B.4 em coordenadas cilíndricas, fazendo  $x_d = d \cdot \cos(\phi_d)$  e  $y_d = d \cdot \sin(\phi_d)$ , onde  $d$  é o valor do desalinhamento radial absoluto e expandindo a integral de superfície como uma integral dupla sobre a área circular do receptor, a potência detectada pelo receptor é igual a:

$$P_{RX} = A_0^2 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp \left( \frac{-2d^2}{r_L^2} \right) \times \int_0^{r_R} \left\{ \rho \cdot \exp \left( \frac{-2\rho^2}{r_L^2} \right) \int_0^{2\pi} \exp \left[ \frac{4d \cdot \rho \cdot \cos(\phi - \phi_d)}{r_L^2} \right] d\phi \right\} d\rho. \quad (\text{B.5})$$

Tendo em vista que a área de integração é circular, é possível particularizar, sem a perda de generalidade, considerando  $\phi_d = 0$ . Portanto, a integral interna pode ser escrita da seguinte forma:

$$\int_0^\pi \exp \left[ \frac{4d \cdot \rho \cdot \cos(\phi)}{r_L^2} \right] d\phi + \int_\pi^{2\pi} \exp \left[ \frac{4d \cdot \rho \cdot \cos(\phi)}{r_L^2} \right] d\phi. \quad (\text{B.6})$$

Pode-se fazer uma substituição na última integral ( $\phi' = \phi + \pi$ ). Ambas as integrais da Eq. B.6 se assemelham à função de Bessel modificada de primeira ordem,  $\alpha = 0$ , na forma integral, dada por

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp [x \cdot \cos(\phi)] d\phi. \quad (\text{B.7})$$

Assim, para  $x = \frac{4d\rho}{r_L^2}$ , e sabendo que  $I_0(x) = I_0(-x)$ , a Eq. B.5 pode ser reescrita como

$$P_{RX} = A_0^2 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp \left( \frac{-2d^2}{r_L^2} \right) \times 2\pi \int_0^{r_R} \left\{ \rho \cdot \exp \left( \frac{-2\rho^2}{r_L^2} \right) \cdot I_0 \left( \frac{4d\rho}{r_L^2} \right) \right\} d\rho. \quad (\text{B.8})$$

A integral em  $\rho$  da Eq. B.8 está diretamente relacionada à distribuição do Rice. Assim, é conveniente reescrevê-la por meio de uma diferença de duas integrais impróprias,

$$\int_0^{r_R} f(\rho) d\rho = \int_0^\infty f(\rho) d\rho - \int_{r_R}^\infty f(\rho) d\rho. \quad (\text{B.9})$$

De acordo com (PRUDNIKOV et al., 1986):

$$\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} \exp(-px^2) I_0(cx) dx = \frac{1}{2} p^{-\frac{\alpha}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot {}_1F_1\left(\frac{\alpha}{2}, 1, \frac{c^2}{4p}\right), \quad (\text{B.10})$$

onde  ${}_1F_1$  é a função hipergeométrica confluyente e  $\Gamma$  é a função gama.

Quando  $x = \rho$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\rho = \frac{2}{r_L^2}$  e  $c = \frac{4d}{r_L^2}$ , é possível reescrever:

$$\int_0^{\infty} \left[ \rho \cdot \exp\left(\frac{-2\rho^2}{r_L^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{4d\rho}{r_L^2}\right) \right] d\rho = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_L^2}{2} \cdot \Gamma(1) \cdot {}_1F_1\left(1, 1, \frac{16d^2}{8r_L^2}\right). \quad (\text{B.11})$$

Sabendo que  ${}_1F_1(1, 1, z) = \exp(z)$  e  $\Gamma(1) = 1$ , pode-se reduzir a Eq. B.6:

$$\int_0^{\infty} \left[ \rho \cdot \exp\left(\frac{-2\rho^2}{r_L^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{4d\rho}{r_L^2}\right) \right] d\rho = \frac{r_L^2}{4} \cdot \exp\left(\frac{2d^2}{r_L^2}\right). \quad (\text{B.12})$$

Do trabalho de (NUTTALL, 1975), sabe-se que:

$$\int_b^{\infty} x^m \cdot \exp\left(-\frac{p^2 x^2}{2}\right) \cdot I_{m-1}(ax) dx = \frac{1}{a} \left(\frac{a}{p^2}\right)^{m-1} \cdot \exp\left(\frac{a^2}{2p^2}\right) \cdot Q_m\left(\frac{a}{p}, bp\right), \quad (\text{B.13})$$

onde  $Q_m$  é a função Q de Marcum de ordem  $m$ , definida como:

$$Q_m(a, b) = \int_b^{\infty} x \left(\frac{x}{a}\right)^{m-1} \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_{m-1}(ax) dx, m \geq 1. \quad (\text{B.14})$$

Quando  $m = 1$ ,  $p = \frac{2}{r_L^2}$ ,  $a = \frac{4d}{r_L^2}$  e  $b = r_r$ , é possível reescrever a Eq. B.13, como:

$$\int_{r_r}^{\infty} \left[ \rho \cdot \exp\left(\frac{-2\rho^2}{r_L^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{4d\rho}{r_L^2}\right) \right] d\rho = \frac{r_L^2}{4} \cdot \exp\left(\frac{2d^2}{r_L^2}\right) \cdot Q_1\left(\frac{2d}{r_L}, \frac{2r_r}{r_L}\right). \quad (\text{B.15})$$

Agora, fazendo a [Eq. B.12 - Eq. B.14], a Eq. B.5 pode ser reescrita, como:

$$P_{RX} = A_0^2 \frac{r_t^2}{r_L^2} \exp\left(\frac{-2d^2}{r_L^2}\right) \times 2\pi \left[ \frac{r_L^2}{4} \exp\left(\frac{2d^2}{r_L^2}\right) - \frac{r_L^2}{4} \exp\left(\frac{2d^2}{r_L^2}\right) Q_1\left(\frac{2d}{r_L}, \frac{2r_r}{r_L}\right) \right], \quad (\text{B.16})$$

O que leva a:

$$P_{RX} = A_0^2 \cdot \frac{\pi r_t^2}{2} \left[ 1 - Q_1\left(\frac{2d}{r_L}, \frac{2r_r}{r_L}\right) \right]. \quad (\text{B.17})$$

Sabe-se que atenuação geométrica e as perdas por desalinhamento são definidas por  $\alpha = P_{RX}/P_{TX}$  quando são desprezadas as perdas por absorção e espalhamento atmosférico. Percebe-se que o termo externo aos colchetes na Eq. B.17 é igual a potência transmitida, que foi obtida por meio da Eq. B.12, pela integração da irradiância sobre um plano infinito em qualquer ponto  $z = L$ , em coordenadas cilíndricas. Consequentemente, a atenuação geométrica mais a perda por desalinhamento radial são iguais a

$$\alpha = \left[ 1 - Q_1 \left( \frac{2d}{r_L}, \frac{2r_r}{r_L} \right) \right]. \quad (\text{B.18})$$

É interessante notar que a Eq. B.18 tem a mesma forma de uma função de distribuição cumulativa Raicana de  $r_r$ , com o *parâmetro de forma*  $K = 2d^2/r_L^2$  e o *parâmetro de escala*  $\Omega = d^2 + r_L^2/2$ .

Usando a Eq. B.14, para  $d = 0$  e  $m = 1$ , a Eq. B.18 torna-se igual à Eq. 3.13, como

$$Q_1 \left( 0, \frac{2r_r}{r_L} \right) = \int_{\frac{2r_r}{r_L}}^{\infty} x \cdot \exp \left( \frac{-x^2}{2} \right)^{m-1} \cdot dx = \exp \left( -\frac{2r_r^2}{r_L^2} \right). \quad (\text{B.19})$$

Assim, a Eq. B.18 é uma solução geral para a Eq. B.3 ao considerar o desalinhamento. Quando apenas a atenuação do desalinhamento é considerada, sua expressão é a seguinte:

$$\alpha_m = \frac{1 - Q_1 \left( \frac{2d}{r_L}, \frac{2r_r}{r_L} \right)}{1 - \exp \left( -\frac{2r_r^2}{r_L^2} \right)}. \quad (\text{B.20})$$

A função Q de Marcum é amplamente usada para resolver problemas de detecção de radar, estatística e teoria de probabilidade. Embora sua formulação envolva funções de Bessel e integrais impróprias, já existem algoritmos consolidados, capazes de resolvê-la com desempenho excepcional (SHNIDMAN, 1989; GIL; SEGURA; TEMME, 2014). Assim, o uso direto da Eq. B.17 como uma solução para a Eq. B.4 proporciona um ganho de desempenho em simulações de enlaces ópticos com desalinhamento, principalmente em sistemas móveis, onde é necessário recalculá-la a cada iteração.

A Eq. B.17 também pode ser usado quando há um pequeno desalinhamento angular, também conhecido como inclinação, entre o transmissor e o receptor. Para considerar o desalinhamento radial e angular em ambas as direções ( $x$  e  $y$ ), a potência recebida pode ser calculada substituindo  $d$  na Eq. B.18 por

$$d = \sqrt{[x_c + L \cdot \tan(\gamma_y)]^2 + [y_c + L \cdot \tan(\gamma_x)]^2}, \quad (\text{B.21})$$

onde  $\gamma_y$  é o ângulo para rotação no eixo  $y$  e  $\gamma_x$  é o ângulo para rotação no eixo  $x$ .