

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**COMUNICAÇÃO ÓTICA DE ESPAÇO LIVRE ENTRE NAVIOS:
Uma introdução ao tema e uma proposta de aprimoramento de modelo**



PRIMEIRO-TENENTE GABRIEL DO COUTO VELLOZO

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE GABRIEL DO COUTO VELLOZO

COMUNICAÇÃO ÓTICA DE ESPAÇO LIVRE ENTRE NAVIOS:
Uma introdução ao tema e uma proposta de aprimoramento de modelo

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Segurança da Informação e Comunicações.

Orientadores:

Prof. Dr. Guilherme Penello Temporão

Primeiro-Tenente Wanderley Abilio Do Nascimento Júnior

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE GABRIEL DO COUTO VELLOZO

COMUNICAÇÃO ÓTICA DE ESPAÇO LIVRE ENTRE NAVIOS:
Uma introdução ao tema e uma proposta de aprimoramento de modelo

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Segurança da Informação e Comunicações.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN) Gian Karlo Huback Macedo de Almeida – CIAA

Prof. Dr. Guilherme Penello Temporão – PUC Rio

Primeiro-Tenente Wanderley Abilio Do Nascimento Júnior

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho a Deus, que me guia e governa pelos mares de tribulações, a minha companheira, Patrícia Brunes Lourêdo, e aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Venho por meio deste agradecer a todos que tornaram possível a conclusão desta monografia, foram muitas as mãos que me guiaram e incentivaram ao longo desta jornada acadêmica, e não poderia estar mais grato por todo o apoio que recebi.

Primeiramente agradeço a Deus por ter me guiado, orientado e motivado durante todo o trajeto que percorri esse ano. Sem Sua proteção e benção sei que não chegaria até aqui.

Em segundo lugar, quero expressar minha gratidão à minha companheira Patrícia Brunet Lourêdo. Seu apoio constante, compreensão e incentivo em todas as fases de minha carreira, sobretudo durante este e outros cursos, foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios que do dia a dia e alcançar as vitórias que vivemos.

Ao meu orientador acadêmico, Prof. Dr. Guilherme Penello Temporão, agradeço por me motivar na escolha do tema, no aprofundamento do conhecimento e pela ajuda para explorar este campo que é tão vasto e complexo, e muitas vezes pouco comentado. Seus apontamentos permitiram que eu concatenasse minhas ideias e encontrasse as soluções necessárias para o problema em análise.

Ao orientador técnico, Primeiro-Tenente Wanderley Abilio Do Nascimento Júnior, meu sincero agradecimento. Sua expertise na elaboração, formatação e ajustes em artigos foram essenciais para que este trabalho atingisse o nível de qualidade buscado. Sua dedicação em fornecer orientações precisas e valiosas fizeram toda a diferença.

Não posso deixar de agradecer ao coordenador do curso, Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN) Gian Karlo Huback Macedo de Almeida, que sempre esteve disponível para ouvir nossas preocupações e procurou nos auxiliar quando necessário. Sua abertura para o diálogo e seu compromisso em fornecer o suporte necessário tornaram este percurso acadêmico mais fluido e gratificante.

Por fim, quero agradecer a todos os familiares, amigos e companheiros de turma que estiveram ao meu lado durante essa jornada. O apoio moral proporcionado por eles foi um grande impulso para que eu conseguisse superar os desafios e concluísse esta monografia com sucesso.

A todos vocês, muito obrigado, este trabalho é o resultado de um esforço coletivo, e estou verdadeiramente grato por cada contribuição e gestos de apoio ao longo dessa jornada.

“Seja extremamente sutil, tão sutil que ninguém possa achar qualquer rastro.

Seja extremamente misterioso, tão misterioso que ninguém possa ouvir qualquer informação.

Se um general puder agir assim, então, poderá celebrar o destino do inimigo em suas próprias mãos.”

Sun Tzu

COMUNICAÇÃO ÓTICA DE ESPAÇO LIVRE ENTRE NAVIOS:
Uma introdução ao tema e uma proposta de aprimoramento de modelo

Resumo

O constante aumento na demanda de sistemas de comunicação cada vez mais velozes e seguros é uma realidade tanto para setores comerciais quanto governamentais, e isto não é diferente na Marinha do Brasil, onde seus meios navais precisam enviar e receber informações com confiabilidade, segurança e velocidade. Porém, quando em situações de conflito, estes meios devem evitar ao máximo a comunicação através de ondas de rádio ou micro-ondas, apesar de serem as formas mais utilizadas, pois estas transmissões podem expor a localização de uma fonte emissora e facilitar um ataque inimigo. Por conta disto, esta monografia busca apresentar uma tecnologia de comunicação com base em transmissões óticas através do espaço livre, a *Free Space Optics*, a qual pode garantir não só elevadas velocidades de transmissão de dados, devido à possibilidade de operar em taxas de gigabits por segundo, como também por conta da segurança e da discricção que pode proporcionar, em detrimento da alta diretividade de suas emissões. Em proveito ao tema, e com o objetivo de dar continuidade nas tarefas de pesquisa e desenvolvimento de conhecimentos, será descrito e criticado um modelo de comunicações óticas de espaço livre em meios navais apresentado na tese de mestrado de Oguzhan Timus, para assim verificar se não foram deixados problemas sem tratamento e se houver espaço, apresentar sugestões de melhorias à luz das novas tecnologias.

Palavras- chave: Comunicações, *Free Space Optics*, velocidade, segurança e discricção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Categorias de ondas eletromagnéticas.....	19
Figura 2.1 – Cenário de comunicação por RF entre navios no mar	22
Figura 2.2 – Link de comunicação óptica estabelecido entre navios.....	23
Figura 3.1 – Fotos dos dispositivos da EC System e Viasat Inc, respectivamente.....	26
Figura 4.1 – Dispersão Rayleigh e Mie.....	34
Figura 5.1 – Fotografia do transceptor da faculdade <i>Johns Hopkins</i> durante os testes.....	36
Figura 6.1 – Efeito de desvio por conta de turbulência.....	37
Figura 6.2 – Desvio e deformação do feixe.....	37
Figura 6.3 – Medição da turbulência na Baía de Chesapeake.....	38
Figura 7.1 – Ilustração de dois navios se comunicando por laser em LOS.....	40
Figura 8.1 – Padrão de feixe com resolução de apontamento de θ	41
Figura 9.1 – Eixos de liberdade de movimento de um navio.....	42
Figura 10.1 – Absorção do olho a diferentes comprimentos de onda.....	44
Figura 11.1 – Diagrama de blocos do modelo de sistema FSO.....	45
Figura 11.2 – Comportamento de uma plataforma estabilizada.....	46
Figura 11.3 – A esquerda o CCR e a direita um transceptor com quatro CCR.....	47
Figura 11.4 – Fases necessárias para executar a aquisição.....	48
Figura 11.5 – Representação de um FSM e seus eixos de liberdade de movimento.....	49
Figura 12.1 – Transceptor Esférico.....	55
Figura 12.2 – Funcionamento do apontamento com uso de RF.....	56
Figura 12.3 – Lente líquida eletrostática.....	57
Figura 12.4 – Lente líquida de material de cristal líquido.....	58
Figura 12.5 – Lente líquida hidráulica acionada mecanicamente.....	58
Figura 12.6 – Representação de um DM e seus tipos.....	60
Figura 12.7 – Representação de uma frente de onda sendo corrigida por um DM.....	61
Figura 12.8 – Diagrama de blocos do modelo aprimorado de sistema FSO.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Área de cobertura cônica em distância de emissões RF e IV.....	25
Tabela 2.1 – Sistemas de comunicação comuns utilizados em navios.....	27
Tabela 3.1 – Relação de níveis de atenuação em links FSO de 1550nm.....	35
Tabela 4.1 – Limite de exposição máxima por comprimento de onda.....	44
Tabela 5.1 – Comparação dos dois modelos.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 – Taxas de BER medidas em um link FSO na Baía de Chesapeake.....	29
Gráfico 1.2 – Teste de BER.....	30
Gráfico 2.1 – Gráfico comparativo de AEL entre IV e RF.....	32
Gráfico 3.1 – Gráfico de transmitância média dos comprimentos de onda de 0,4 a 2,5 μ m....	33

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEL	Atenuação do Espaço Livre
CCR	Refletores Cúbicos de Canto
DM	<i>Deformable Mirror</i> - Espelho deformável
FSM	<i>Fast Steering Mirrors</i> - Espelho de Direção Rápida
FSO	<i>Free Space Optics</i> - Ótica de Espaço Livre
IOT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
IV	Infravermelho
MB	Marinha do Brasil
LIA	Instituto de Laser da América
LL	Lentes Líquidas
LLCL	Lentes Líquidas de Cristal Líquido
LLE	Lentes Líquidas Eletrostática
LLHM	Lentes Líquidas Hidráulica Acionada Mecanicamente
LOS	<i>Line of Sight</i> – Linha de visada
MAGE	Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica
MEM	Mecanismo Micro Eletromecânico
MO	Micro-ondas
MPE	Exposição Permissível Máxima
NRL	<i>Naval Research Laboratory</i> - Laboratório Naval de Pesquisas
RF	Radiofrequência
SISCOM	Sistemas de Comunicação

LISTAS DE SÍMBOLOS

h	Altura do cone circular
a.C	Antes da Era Cristã
λ	Comprimento de onda
π	Constante matemática com valor aproximado de 3,1415
dB	Decibel
dB/km	Decibel por quilômetro
fps	<i>frames</i> por segundo
Gbps	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
°	Graus
Hz	Hertz
m	Metro
m ²	Metro quadrado
Mbps	Megabits por segundo
μrad	Micro radianos
μm	Micrômetro
μs	Microsssegundos
ms	Milissegundos
mW/cm ²	Miliwatt por centímetro quadrado
nm	Nanômetro
km	Quilômetro
r	Raio da base do cone circular
4k	Resolução de imagem aproximada de 3840 pixels na horizontal e 2160 na vertical
tan	Tangente de um ângulo

THz	Terahertz
θ	Variável que representa o ângulo de divergência
d	Variável que representa uma distância em quilômetros
dl	Variável que representa a distância da linha de visada
ho	Variável que representa a altura do observador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Apresentação do Problema	15
1.2 Justificativa e Relevância	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Organização do Trabalho	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Emissões eletromagnéticas	19
2.2 Tecnologias Óticas De Espaço Livre	20
2.2.1 Comunicações discretas.....	24
2.2.2 Taxa de transmissão de dados.....	26
2.2.3 Bit Error Rate – Taxa de erro de Bit (BER).....	27
2.3 Desafios da FSO	30
2.3.1 Efeitos Atmosféricos.....	31
2.3.1.1 Absorção.....	32
2.3.1.2 Dispersão.....	33
2.3.1.3 Turbulência.....	36
2.3.2 Limitações inerentes ao sistema.....	39
2.3.2.1 Line of Sight - Linha de visada (LOS).....	39
2.3.2.2 Precisão Direcional.....	40
2.3.3 Os movimentos realizados por navios.....	41
2.3.4 Segurança do laser.....	43
2.4 Modelo em análise	45
3 METODOLOGIA	51
3.1 Classificação da Pesquisa	51
3.1.1 Classificação Quanto aos Fins	52
3.1.2 Classificação Quanto aos Meios	52
3.2 Limitações do Método	52

3.3 Coleta e Tratamento dos Dados.....	53
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
5 CONCLUSÃO	63
5.1 Considerações Finais	64
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	64
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A *Free Space Optics* (FSO), que em português significa Ótica de Espaço Livre, é uma tecnologia de comunicação que usa lasers, em vez de ondas de rádio, para transmitir dados através do espaço livre, sem a necessidade de cabos ou fibras ópticas.

Esta teve seu primeiro modelo funcional demonstrado em 1880, através do experimento de Alexander Graham Bell, o chamado de Fotofone, o qual captava a voz do usuário, convertia em um sinal de pulsos luminosos e os enviava a um receptor que os convertia novamente em sinais sonoros (Timus, 2004).

Pode-se notar que hoje esta tecnologia já tem diversas aplicações como transmissão de dados entre prédios, entre estações e trens de alta velocidade e entre satélites e estações terrenas. Cada aplicação tem modelos específicos, os quais visam atender a cada tipo de plataforma na qual está instalada (Malik; Singh, 2015).

A FSO apresenta diversas vantagens em relação a outras formas de comunicação, sendo a mais notável sua alta taxa de transferência de dados, podendo atingir velocidades de transmissão extremamente elevadas, na ordem de gigabits por segundo (Timus, 2004).

Além disso, oferece uma excelente segurança a interceptação de dados, devido a transmissão de dados ocorrer através de feixes de luz altamente direcionados, os quais são de difícil interceptação, sem que se note a presença de um elemento estranho. Isso a faz uma escolha atraente para aplicações críticas, como comunicações militares (Muñoz, 2022), financeiras e governamentais, onde a segurança é prioridade absoluta (Timus, 2004).

Por conta da aplicabilidade e possibilidades da tecnologia que serão tratadas nesta dissertação, será analisado o modelo de sistema de comunicação FSO para navios militares, apresentado por Oguzhan Timus, em sua tese de mestrado “*FREE SPACE OPTICS COMMUNICATION FOR NAVY SURFACE SHIP PLATFORMS*” aprovada pela *NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL*, em 2004.

1.1 Apresentação do Problema

O artigo em pauta traz diversas informações sobre o tema FSO, como as suas capacidades, sua aplicabilidade em meios navais e os desafios a serem superados. Além disso, apresenta alguns equipamentos que podem ser utilizados para vencer estes problemas.

Este é uma das poucas fontes públicas de informação sobre FSO aplicada a navios, uma vez que os componentes utilizados para realizar testes neste campo tem valores elevados e não há um mercado amplo para fomentar o investimento na área.

Apesar disso, o artigo já tem quase duas décadas de publicação e, nesse período, diversos avanços foram feitos nesta área, como o desenvolvimento de novos conceitos e componentes que permitiram evoluções neste tipo de tecnologia.

Logo, muitas informações precisam ser atualizadas e certas afirmações precisam ser revisadas, tais como os tratamentos de problemas e as escolhas de componentes. Sendo assim, seria possível publicar uma informação atual, permitir a difusão do conhecimento e fomentar os estudos na área.

1.2 Justificativa e Relevância

A tecnologia FSO tem duas características extremamente relevantes, não só para o mercado de comunicações, como também para a Marinha do Brasil (MB). São elas a alta taxa de transmissão de dados e a segurança nas transmissões.

A velocidade da transferência de dados neste tipo de sistema pode chegar a ser 1000 vezes mais rápida do que a dos sistemas utilizados hoje em navios (Alqurashi et al., 2022), o que permitiria uma troca eficiente de diversos tipos de informação, através de diversas mídias e de forma simultânea.

A segurança da transmissão em FSO não é consequência específica de técnicas revolucionárias ou métodos de criptografias robustos, e sim da natureza da emissão. Para que este sistema funcione ele exige que os meios comunicantes estejam no visual um do outro e que suas irradiações sejam altamente concentradas, na ordem de décimos de graus, o que gera uma área de cobertura pequena (Alkholidi; Altowij, 2014).

Outro ponto importante é que essas emissões sofrem muita perda, ou seja, detectá-las a longas distâncias se torna uma tarefa muito difícil o que permite consolidar um Sistema de Comunicação (SISCOM) que dificilmente vai ser interceptado, diferente de outras tecnologias (Timus, 2004), como será explorado mais adiante.

Por conta disso, o assunto pode trazer vantagens a MB se utilizar esta tecnologia em operações em áreas onde se comunicar pode comprometer uma operação, ou mesmo entender os desafios que terá de enfrentar, se tiver que entrar em conflito com elementos que dominem este tipo de tecnologia.

1.3 Objetivos

De forma a resolver o problema proposto foram definidos alguns objetivos para este estudo, iniciando por um objetivo geral, sendo este a representação geral do fim deste trabalho e, em seguida, tratar alguns os objetivos específicos, de forma que possa ser compreendida a tecnologia tratada neste artigo, contemplando seu funcionamento, capacidades, dificuldades e realizando posteriores análises.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste artigo é produzir uma crítica ao modelo do autor em pauta, analisando se as escolhas de componentes feitas a época ainda são as melhores, e, tendo em vista o surgimento de novas tecnologias no mercado, propor incrementos no projeto para tratar possíveis pontos não vislumbrados, se assim o couber, e consolidar a proposta de um novo modelo, o qual será exibido no final desta apreciação.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o propósito descrito acima, o estudo trará alguns conceitos básicos de forma a permitir que o leitor possa compreender o que é a tecnologia FSO, as características de suas emissões, as capacidades do tipo de sistema e suas vantagens.

Além disso, serão apresentados os desafios a serem levados em consideração, sejam da natureza de suas irradiações ou do meio de propagação.

1.4 Organização do Trabalho

Primeiramente foi definida uma seção para tratar os referenciais teóricos. Nela ocorrerá uma breve introdução técnica para abordar o que é espectro eletromagnético, o tipo de onda eletromagnética utilizada e abordar a tecnologia FSO, explicando seu funcionamento e comentando as suas capacidades.

Também serão tratados o comportamento destas emissões na atmosfera, a influência do clima e as dificuldades geradas pelos movimentos inerentes ao deslocamento de um navio.

O propósito desta é possibilitar o entendimento da escolha de componentes e parâmetros nas posteriores tomadas de decisões.

Em seguida será apresentada a metodologia da pesquisa, classificando o tipo de trabalho pelos fins e pelos meios, seguido da definição da limitação do método, e por último, explicar o processo da coleta de dados e do tratamento.

Na quarta seção ocorrerá a crítica ao modelo em pauta, onde serão apresentadas soluções de mercado para tratamento de problemas no campo da FSO e realizadas propostas de mudanças para aprimoramento da abstração.

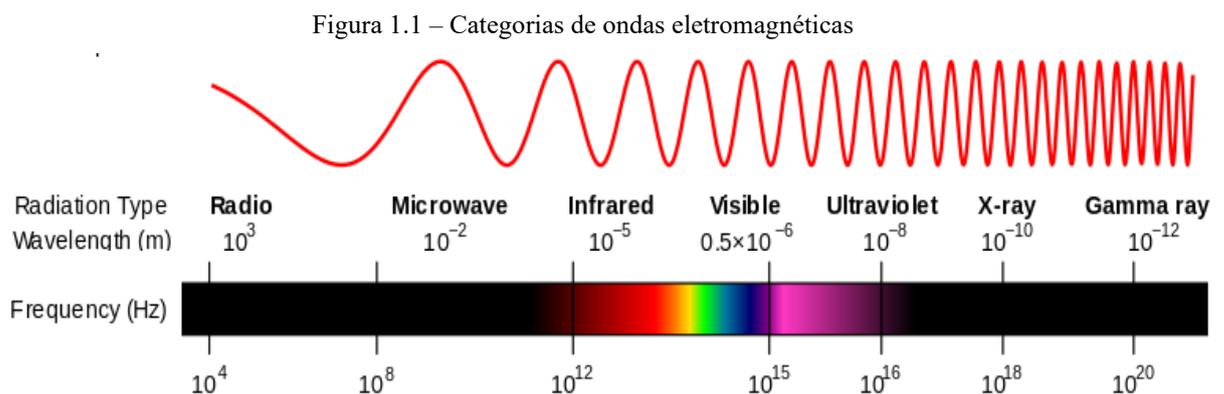
E por fim, suceder-se-ão a conclusão e a apresentação algumas tecnologias e conceitos emergentes no ramo das comunicações, de forma a justificar e motivar estudos futuros e o investimento nesta área.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De forma a equalizar o conhecimento sobre o assunto abordado, este capítulo apresentará as definições e os conceitos necessários para a compreensão do tema e, em seguida, expor o modelo em pauta.

2.1 Emissões eletromagnéticas

O espectro eletromagnético pode ser descrito como um agrupamento de todas as possíveis frequências de radiação eletromagnética. Estas são ordenadas em ordem crescente de frequência e divididas em alguns grupos, sendo eles os das Ondas de Rádio, das Micro-ondas (MO), do Infravermelho (IV), da Luz Visível, do Ultravioleta, dos Raios X e dos Raios Gamma (Physik Instrumente, 2021).



Fonte: Modificado de Physik Instrumente, 2021.

Cada grupo possui características distintas e pode ser utilizado para propósitos específicos, tal como as Ondas de Rádio em transmissões de rádio e televisão, as Micro-ondas em SISCO via satélite e canais da rede móvel celular ou os Raios X os quais podem ser utilizados para fins médicos.

Em suma, cada grupo possui um comportamento característico e pode ser utilizado para os mais diversos propósitos. O grupo de interesse deste estudo será o IV, que compreende as frequências de 300GHz a 430THz (Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2014).

Este foi descoberto pelo astrônomo inglês William Herschel em 1800, através de um experimento no qual refratou uma fonte de luz com um prisma e colocou um termômetro de mercúrio na região de cada uma das cores do espectro visível. Ele percebeu que a temperatura aumentava pela incidência da luz e que isso ocorria de forma mais rápida quanto mais próximo da extremidade vermelha (Azevedo, 2021).

Porém, ao colocar o bulbo do termômetro em uma região que ficava após o vermelho, que é uma região onde não há cor, notou um aquecimento ainda maior. Logo, Herschel chegou à conclusão de que deveria haver algum tipo de radiação que o nosso olho não percebesse e, visto que ficava antes da faixa vermelha, ele denominou de radiações IV (Azevedo, 2021).

As ondas IV são irradiadas por todos os corpos quentes, tais como lâmpadas, carvão em brasa e animais de sangue quente, como os seres humanos. Alguns animais conseguem detectar estas emissões e utilizá-las para orientação ou busca de alimento (Khan Academy, 2023).

Algumas tecnologias se utilizam deste grupo como câmeras de visão noturna (Tanaka, 2021), controles remotos de equipamentos (Dialogando, 2020) e satélites de registro de imagem, seja da Terra ou do Espaço Sideral, usados para detectar estrelas, galáxias, planetas, lançamentos de mísseis, erupções vulcânicas (Murphy, 2013) e etc.

Outro uso extremamente importante é a aplicação em transmissões de dados, através de fibras óticas (Fiber Mall, 2023), as quais conectam os continentes do globo e assim permitem o funcionamento da Internet (Cancelier, 2023).

2.2 Tecnologias Óticas De Espaço Livre

As tecnologias convencionais de comunicação no espaço livre fazem uso de Ondas de Rádio ou Micro-ondas para enviar dados entre as estações interessadas. Já os SISCOM baseados em FSO se utilizam de pulsos luminosos, no formato de feixes direcionais, para transmitir dados pelo ar (Kumar; Sharma, 2022).

Estes feixes são produzidos por lasers de baixa ou alta potência, dependendo do tipo de aplicação e a distância envolvida (Kaushal; Kaddoum, 2015), os quais recebem uma modulação com as informações a serem enviadas entre as partes interessadas (Nguyen, 2015), ao se converter os sinais elétricos, ou analógicos, em pulsos de luz infravermelha.

Este sistema de comunicação já vem sendo estudado no meio militar desde a década de 1960, quando pesquisadores e engenheiros militares aplicaram a tecnologia FSO em dispositivos de comunicação para fornecer transmissões de dados e voz seguras (Timus, 2004).

Tais dispositivos não seriam suscetíveis a interceptações ou interferências inimigas, diferente dos sistemas baseados em radiofrequência (RF), no entanto, os primeiros sistemas FSO eram limitados pelo alcance, podendo transmitir apenas alguns kilobits de dados por segundo, além disto eram extremamente vulneráveis a interferências meteorológicas (Timus, 2004).

Já na década de 1980, foram estudadas soluções para os principais desafios desta tecnologia, e desde esta época, as FSO têm sido implantadas com sucesso, sendo utilizadas principalmente para comunicação entre estações fixas, onde a instalação de uma infraestrutura de fibra ótica seria muito custosa ou inviável (Timus, 2004).

E agora estão sendo utilizadas para transmissão de dados entre elementos na superfície na terra e até mesmo entre estes e satélites no espaço (Malik; Singh, 2015). Essas possibilidades estão sendo exploradas por diversos campos, como é o caso da rede móvel celular, a qual tem explorado a tecnologia para superar a dificuldade de se construir uma infraestrutura cabeada (Muñoz, 2022).

Ou mesmo para funções inusitadas como transferência de informações de ajuste de sincronismo de relógios entre uma estação espacial e outra terrestre (International Frequency Control Symposium, 2018) e entre estações terrenas, com precisão da ordem de fentossegundo (10^{-15} segundos) (Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013).

Isto permitiria aumentar a precisão de uma variedade de campos, incluindo navegação de precisão, interferometria de linha de base longa, arranjos de radares coerentes, geodésias baseadas em relógio e em testes de física fundamental (Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013).

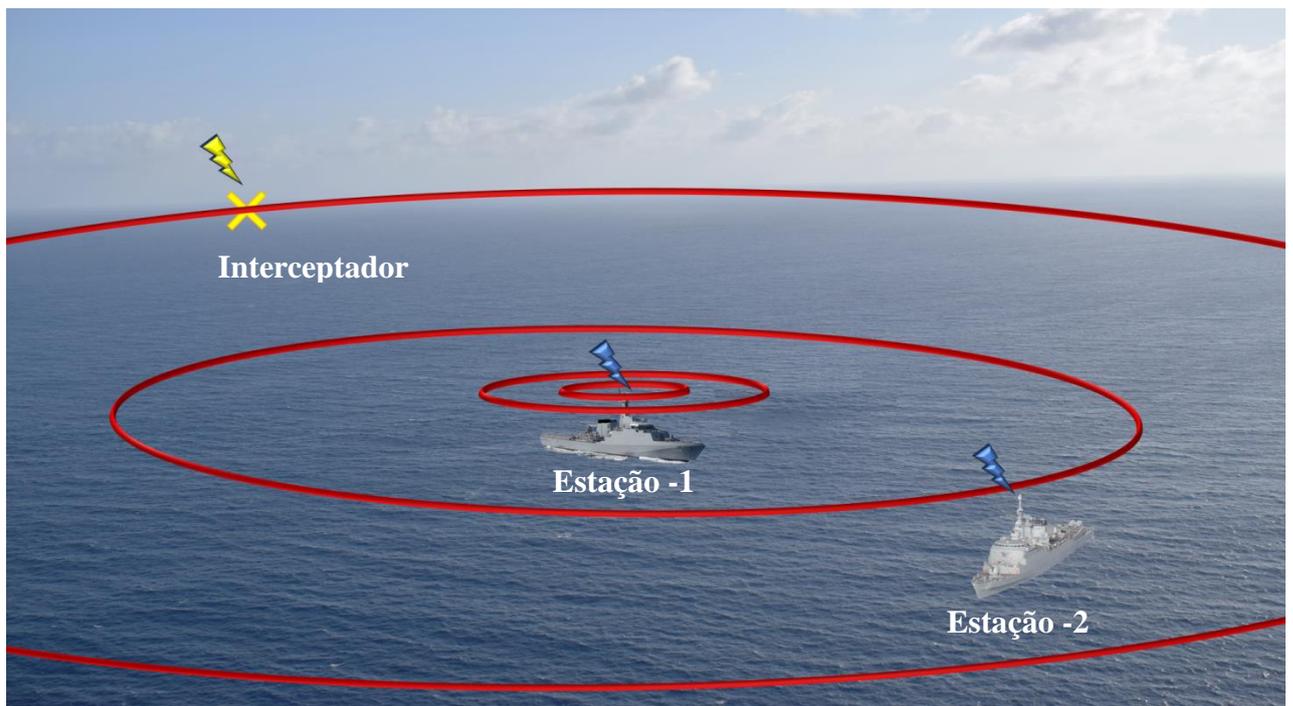
Um ponto importante a se destacar é que conforme a tecnologia de guerra avança, a necessidade de comunicação mais segura, confiável e rápida se torna cada vez mais imperativa. A distribuição de informações oportunas para as unidades de batalha, mantendo os canais de comunicação seguros, é uma das prioridades em uma situação de conflito.

Porém o uso do espectro de RF para comunicações limita severamente o uso dos SISCOM militares atuais. Transmitir em RF oferece uma oportunidade de detectar a localização das plataformas por parte de um inimigo, através da interceptação do sinal, especialmente no caso da Marinha, onde o ambiente de operação não possui obstáculos físicos que possam limitar a propagação dos sinais (Timus, 2004).

Os sistemas avançados de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE) permitem, através da captura dos sinais de uma fonte emissora, calcular a direção e a distância da origem de um sinal, ou seja, a posição do transmissor.

Para isso, tomam com base a direção do sinal recebido e as distorções e atenuações nas frentes de onda que a atmosfera daquela região causa no sinal. Por conta disto, um navio pode ser exposto a algum tipo de ataque de forças inimigas.

Figura 2.1 - Cenário de comunicação por RF entre navios no mar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

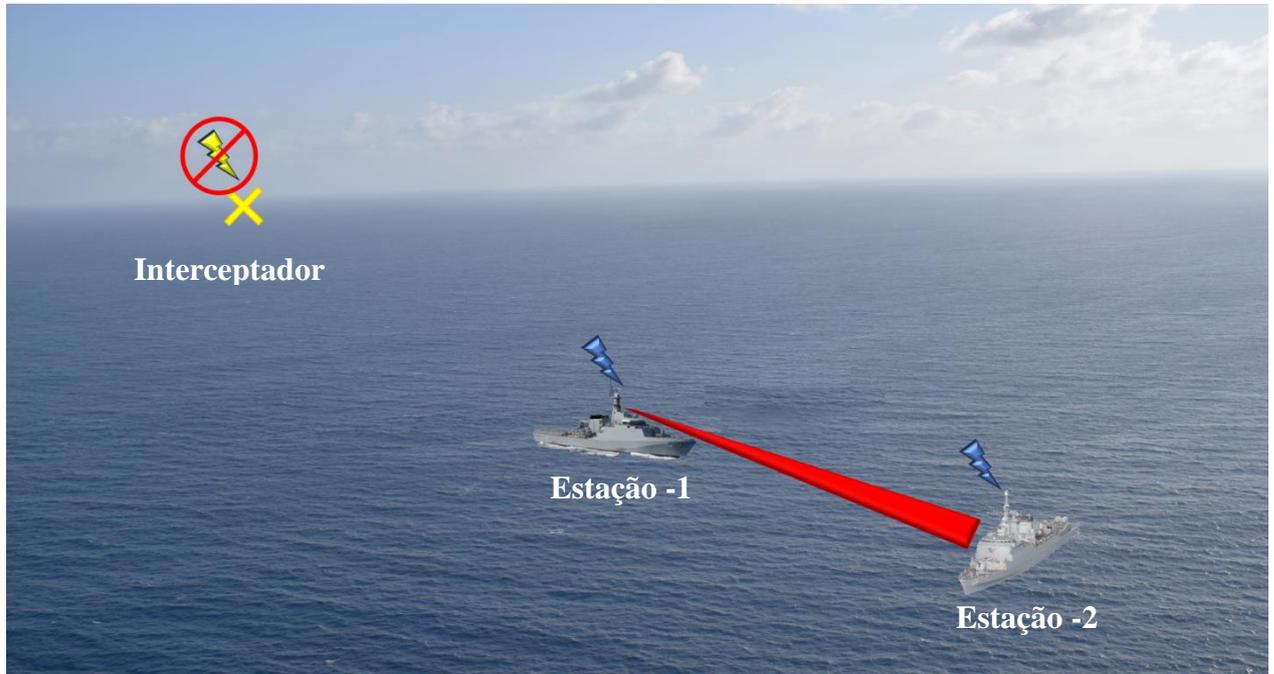
No cenário apresentado, o navio “Estação-1” está se comunicando com “Estação-2” através de um link de rádio. As informações são enviadas por antenas de RF, que transmitem ondas eletromagnéticas de forma omnidirecional.

Um link de comunicação seguro pode ser mantido usando técnicas de criptografia forte e deslocamento de frequência, porém, a localização dos meios nesta situação está comprometida.

Os sinais transmitidos podem ser facilmente interceptados por forças oponentes, uma vez que mesmo as antenas direcionais só conseguem concentrar a maior parte da emissão em uma direção e acabam transmitindo parte da potência de irradiação para todas as direções, o que poderia levar a detecção do navio transmissor (Timus, 2004).

Em um outro cenário, considerando o uso de sistemas FSO, que ao contrário das emissões de RF, transmitem o sinal diretamente para a estação receptora, a situação seria diferente.

Figura 2.2 - Link de comunicação óptica estabelecido entre navios.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta a detecção e interceptação do sinal por um meio não envolvido na comunicação é muito baixa ou totalmente improvável, porque estão sendo usados feixes de laser não visíveis (Timus, 2004) e extremamente direcionais, ou seja, não geram lóbulos secundários (Alkholidi; Altowij, 2014).

Se as forças oponentes não tiverem unidades com linha de visão para a Estação-1, na direção das transmissões, é impossível para elas detectarem qualquer emissão (Timus, 2004). Ou seja, para interceptar comunicações deste tipo a posição do inimigo tem que ser conhecida.

Por conseguinte, o uso de FSO permite a realização de comunicações seguras entre elementos, mantendo a discrição, ou seja, o sigilo da posição dos navios (Timus, 2004).

2.2.1 Comunicações discretas

Políticas e ferramentas de segurança para sistemas militares de comunicações têm sido desenvolvidas a muito tempo, como é o caso da Cifra de César, uma técnica de criptografia utilizada por volta de 100 a.C. (Sidhpurwala, 2023).

E apesar de toda a preocupação e estudos na área, mesmo os sistemas militares mais avançados possuem vulnerabilidades a serem exploradas (Timus, 2004).

Por exemplo, no século XX, foram desenvolvidos SISCOM sem fio e, após este avanço, as forças oponentes empregavam técnicas de varredura e análise do espectro eletromagnético para detectar a presença, perturbar a transmissão e até explorar comunicações não cifradas (Timus, 2004).

Estas medidas obrigaram as forças armadas a usarem novas tecnologias e protocolos para contra-atacar ameaças como o bloqueio, a falsificação e a detecção. Para tal utilizaram técnicas como o salto em frequência, controle de potência e a criptografia (Timus, 2004). No entanto, algumas das vulnerabilidades, como a interceptação, ainda são uma ameaça para SISCOM que se utilizam de RF para enviar informações.

Porém, como exemplificado na seção anterior, esta não é uma realidade para as tecnologias FSO, uma vez que para detectar uma transmissão a laser, um receptor IV deve estar localizado entre as estações emissoras ou atrás de uma delas, dentro da região iluminada pelo cone formado pelo feixe laser, para tentar interceptar a parte não coletada do feixe (Timus, 2004).

Alguns fatores podem reduzir ainda mais a probabilidade de detecção de um sinal laser de IV, como a redução da divergência do feixe e da potência do sinal ou mesmo as condições meteorológicas de um determinado momento (Timus, 2004).

A divergência do feixe de laser é um elemento de extrema importância. Esta depende do ângulo de divergência do transmissor, cujo valor vai provocar a iluminação de uma área que pode ser compreendida como um cone esférico. Estes transmissores têm um ângulo de divergência de centésimos de grau, alguns com cerca de $0,05^\circ$ (EC System International, 2023a).

O tamanho do cone de um dado feixe aumenta com a distância e, para encontrar o raio da base desta figura a uma determinada distância do emissor é utilizada a fórmula:

$$r = h * \tan(\theta/2)$$

Nesta o r é o raio da base do cone, h é a distância do transmissor ao receptor e θ é a divergência do feixe.

Como a linha de visada (LOS) é obrigatória para a comunicação FSO, será adotada uma distância h de 16km, distância aproximada do horizonte para um transmissor montado a 20m acima do nível do mar (Timus, 2004) e um laser com ângulo de divergência de $0,05^\circ$ (EC System International, 2023a).

Para comparação, será considerada uma antena de MO utilizada em comunicação ponto-a-ponto, a qual possui um ângulo de abertura de operação de $1,1^\circ$ (Commscope, 2023).

Vale ressaltar que estes cálculos vão permitir a obtenção do raio da área de cobertura do feixe de meia potência (Timus, 2004), porém, ainda existem coberturas alcançadas por feixes oriundos de lóbulos secundários nas transmissões de RF, os quais foram abstraídos.

$$\theta = 1,1^\circ$$

$$r = 16000\text{m} * \tan(1,1^\circ/2)$$

$$r \approx 153,6\text{m}$$

Para o laser têm-se:

$$r = 16,000 * \tan(0,05^\circ/2)$$

$$r \approx 7 \text{ m}$$

A partir destes raios é possível calcular a área da cobertura destes sinais com a fórmula da área do círculo, $2*\pi*r^2$.

Levando em consideração estas duas fórmulas e os dados calculados anteriormente pode-se construir a tabela 1.1.

Tabela 1.1: Área de cobertura cônica em distância de emissões RF e IV.

Dispositivo	Raio calculado	Área de cobertura	Possui emissões de lóbulo secundário
Antena de RF	153,6m	148.238,9m ²	Sim
Laser de IV	7m	307,9m ²	Não

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando os dados apresentados é possível perceber que a área de detecção de um sinal RF, considerando somente o feixe de meia potência, é aproximadamente 481,45 vezes maior que a de sinais IV, dadas as configurações adotadas, o que permite compreender o quão mais fácil é interceptar um sinal de RF.

Caso se leve em consideração as emissões de lóbulos secundários, as quais não ocorrem em emissões de IV (Alkholidi; Altowij, 2014), têm-se não só o aumento da probabilidade de detecção por se estar emitindo em todas as direções, mesmo que se utilize

sinais de baixa potência, como também a questão da perda de eficiência energética, uma vez que parte do esforço gerado para criar o sinal de RF poderá somente ser aproveitado por um inimigo.

Dessa forma é possível consolidar a ideia de discriminação de emissões FSO, devido a pequena área de cobertura do sinal de IV.

2.2.2 Taxa de transmissão de dados

A FSO tem o potencial de reduzir significativamente o tempo de entrega de informações, assim permitindo a transmissão de vídeos de alta resolução (Timus, 2004) e até mesmo possibilitando SISCOM por voz com o uso de rádios definidos por software através de um único canal e de forma simultânea.

Os vídeos de alta resolução exigem canais de transmissão rápidos, devido à quantidade de dados que devem ser transmitidos em um curto espaço de tempo. A velocidade de um determinado canal de transmissão, chamada de taxa de dados, é medida pela quantidade de bits transmitidos em um segundo.

Produtos FSO comerciais para o meio civil podem oferecer taxas de dados de 100Mbps a 30Gbps (EC System International, 2023a), como o EL-10Gex da *EC System*. (EC System International A.S., 2023b). Ou mesmo de até 40Gbps, em distâncias de até 7km, como o Mercury, da Viasat Inc, lançado em 06 de abril de 2023 (Viasat, 2023b).

Figura 3.1 - Fotos dos dispositivos da EC System e Viasat Inc, respectivamente.



Fontes: EC System International A.S., 2023b e Viasat, 2023b.

Levando em consideração que o recomendado para assistir vídeos em resolução de 4k é de 25Mbps (Pereira, 2023), estes equipamentos permitiriam a transmissão e recepção de

simultânea de diversas videoconferências com alta qualidade e ainda haveria muita disponibilidade para atender outras demandas.

Estas taxas de transmissão de informação tornam os sistemas FSO superiores às tecnologias de comunicação utilizadas em navios, os quais podem ser observados na tabela a 2.1.

Tabela 2.1 - Sistemas de comunicação comuns utilizados em navios.

Sistema	Tecnologia e Tipo Banda de Trabalho	Coverage	Data rate máximo	Aplicação
DSC	VHF, Frequências Marítimas	64km	9.6kbps	Voz
AIS	VHF, Frequências Marítimas	64km	9.6kbps	Dados de posição e movimento
NAV DAT	MF, 500kHz e HF, 4,6,8,12 e16MHz	~ 500km	18kbps	Broadcasting de informações de segurança
VDES	VHF	500km	300kbits	Comunicações digitais
TRITON	IEEE802.16d,5.8GHz	até 14km	6Mbps	Redes entre navios e estações em terra
Mare-Fi	IEEE802.11n,5.8GHz	7km	1Mbps	Conectividade Wi-Fi com estações terrenas
MariComm	LTE/WLAN 824-894MHz / (5.825,5.785,5.765)GHz	100km	>1Mbps	Internet via rádio para navios
BLUECOM+	Ar-Ar: IEEE 802.11g e Ar-Superfície: LTE	>100km	~3Mbps	Prover uma rede via rádio
LTE-maritime	LTE	100km	10Mbps	Conexão entre navios e estações terrenas
Inmarsat	Satélites GEO na banda L	Global, exceto polos	50Mbps	Dados para navios no mar
Iridium	Satélites LEO na banda Ku	Global, exceto polos	46Mbps	Voz e dados para navios no mar
Thuraya	Satélites GEO na banda L	161 países	444kbps	Voz e dados para navios no mar
VSAT	Satélites LEO GEO nas bandas Ka e Ku	Global, exceto polos	~10Mbps	Voz e dados para navios no mar

Fonte: Modificado de Alqurashi et al., 2022.

Ao se observar os dados da planilha acima é possível perceber que a maior taxa de dados em sistemas de comunicações navais com base em RF ou MO não ultrapassa os 50Mbps, o que limita os tipos e a quantidade de serviços que podem escoar por estes canais (Alqurashi et al., 2022).

É por conta disto e do constante aumento de demanda de altas taxas de transmissão de dados, que os SISCOM navais precisam evoluir e a FSO pode atender com facilidade as atuais necessidades.

O fato acima pode ser comprovado devido a preocupação de marinhas estrangeiras em gerar soluções neste campo. Um destes casos foi o conjunto de testes realizados por engenheiros do Laboratório de Física Aplicada da Universidade *Johns Hopkins*, os quais conseguiram estabelecer links FSO entre duas embarcações em movimento, em uma distância de até 10km, com velocidades de até 7,5Gbps (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 2017), ou seja, 150 vezes mais rápido que a melhor das taxas de transmissão em MO.

2.2.3 Bit *Error Rate* – Taxa de erro de Bit (BER)

A sigla BER representa o número de bits de erros recebidos em uma transmissão para uma quantidade de dados enviada. Por exemplo, se uma transmissão tiver BER de 10^{-9} , há um único bit errado em um bilhão de bits transmitidos (Timus, 2004).

O BER indica quantas vezes um pacote ou unidade de dados deve ser retransmitido devido ao recebimento de um bit errado. A taxa de dados de um sistema pode ser ajustada de acordo com este valor, pois, ao reduzir a taxa de dados, o valor do BER também é reduzido, diminuindo assim o número de pacotes que precisam ser retransmitidos (Timus, 2004).

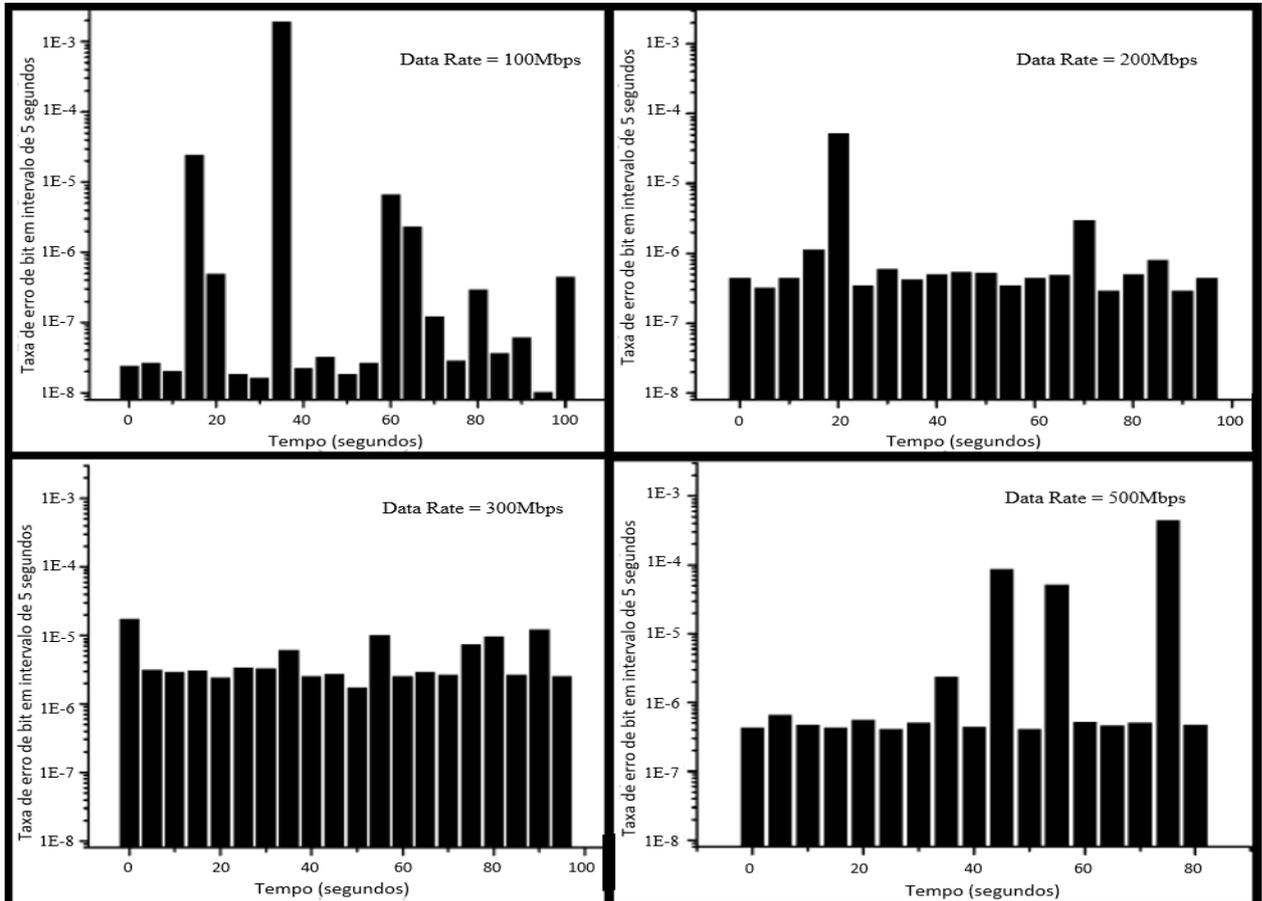
Alguns desenvolvedores FSO apresentam produtos com BER de até 10^{-12} (Park et al., 2022), porém, este valor pode variar por conta de diversos fatores como a distância dos transceptores, as condições meteorológicas, a sensibilidade, o tamanho do receptor, a potência consumida pelo transmissor, entre outros (Timus, 2004).

Para obter valores realistas, as medições de BER devem ser realizadas para diferentes taxas de dados e em diferentes condições meteorológicas. Por conta disto, o *Naval Research Laboratory* (NRL) realizou medições de BER em um protótipo de transceptor FSO, na Baía de Chesapeake, Maryland, Estados Unidos, em 2002 e 2003 (Timus, 2004).

O teste foi realizado em um link com distância de 72 km, quando as condições de turbulência eram baixas. Vale ressaltar que não foi utilizado um sistema de mira ativa ou técnicas de ótica adaptativa para melhorar o desempenho do link (Timus, 2004).

A medição foi realizada em quatro taxas de dados, sendo estas de 100 Mbps, 200 Mbps, 300 Mbps e 500 Mbps. Os resultados da medição de BER estão mostrados no gráfico 1.1.

Gráfico 1.1 - Taxas de BER medidas em um link FSO na Baía de Chesapeake.



Fonte: Adaptado de Moore et al., 2002.

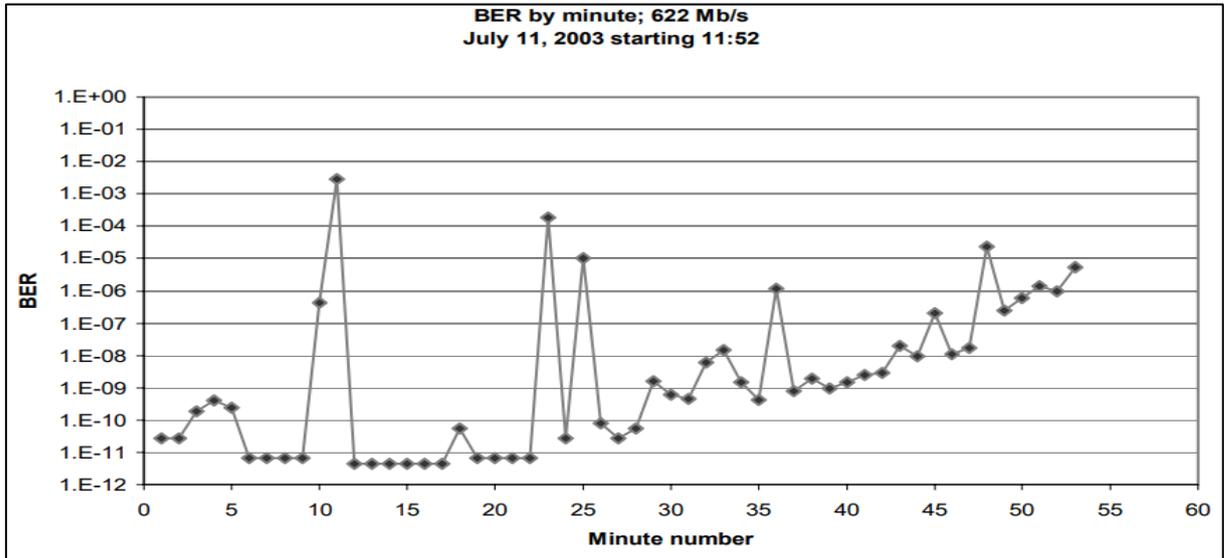
Cada gráfico mostra o BER por aproximadamente 90 segundos, com cada barra representando o BER médio em um intervalo de 5 segundos. O resultado do teste inicial é de certa forma promissor para um link marítimo de longo alcance.

Os testes em diferentes taxas de dados mostraram um BER abaixo de 10^{-5} 90% do tempo. O NRL relatou que o BER acima de 10^{-5} foi provavelmente devido às flutuações do ângulo de chegada, causando uma má acoplagem à fibra do receptor e uma potência resultante baixa no receptor (Timus, 2004).

Outro teste realizado em 11 de julho de 2003, no mesmo protótipo, em um o link de 34,4 km, onde se calculou o BER em intervalos de um minuto, em períodos de uma hora, em diferentes horários do período tarde. Foi utilizada um taxas de dados de 622 Mbps e um

comprimento de onda de 1542nm (Vilcheck et al., 2004). O gráfico abaixo mostra o BER na primeira hora de teste.

Gráfico 1.2 Teste de BER.



Fonte: Adaptado de Vilcheck et al., 2004.

A figura mostra que, apesar das variações, o BER se manteve abaixo de 10^{-7} , durante a primeira hora, em mais de 90% das amostragens. Outro ponto importante é que as condições de turbulência atmosférica eram relativamente estáveis durante esse período, ocorrendo apenas alguns pequenos períodos de instabilidade, os quais geraram picos de BER da ordem de 10^{-3} .

Logo, os resultados dos testes do NRL mostraram que os sistemas FSO podem ser uma solução viável para links marítimos de longo alcance. No entanto, o BER aumenta significativamente em condições de turbulência alta. Isso significa que é importante levar isso em consideração ao projetar e operar um link FSO.

2.3 Desafios da FSO

Embora a tecnologia FSO ofereça diversos benefícios como transmissão de dados rápida, segura e eficiente para fins militares e comerciais, existem condições que afetam o desempenho do link.

Estas ocorrem devido as emissões interagirem com a atmosfera e os fatores meteorológicos, principalmente em situações de chuva forte ou neblina densa, as quais podem espalhar, absorver ou desviar as emissões e impedir comunicações.

Também devem ser avaliadas as limitações inerentes ao tipo de enlace e do meio embarcado, como a necessidade de linha de visada livre, a necessidade de precisão direcional, nível de segurança a exposição dos olhos e os movimentos realizados pelo navio.

Estes são parâmetros importantes e caso sejam ignorados podem limitar o alcance, impedir o uso da tecnologia ou gerar danos à saúde dos usuários. De forma a entender estes efeitos e como devem ser tratados, eles serão explicados nas seções subsequentes.

2.3.1 Efeitos Atmosféricos

Ao se deslocar no espaço livre, um sinal eletromagnético sofre com a perda de sua intensidade, efeito conhecido como Atenuação do Espaço Livre (AEL). Esta condição ocorre de forma inerente ao deslocamento de uma frente de onda no espaço ou na atmosfera.

Seu efeito pode ser calculado através da fórmula abaixo:

$$AEL = (4 * \pi * d / \lambda)^2$$

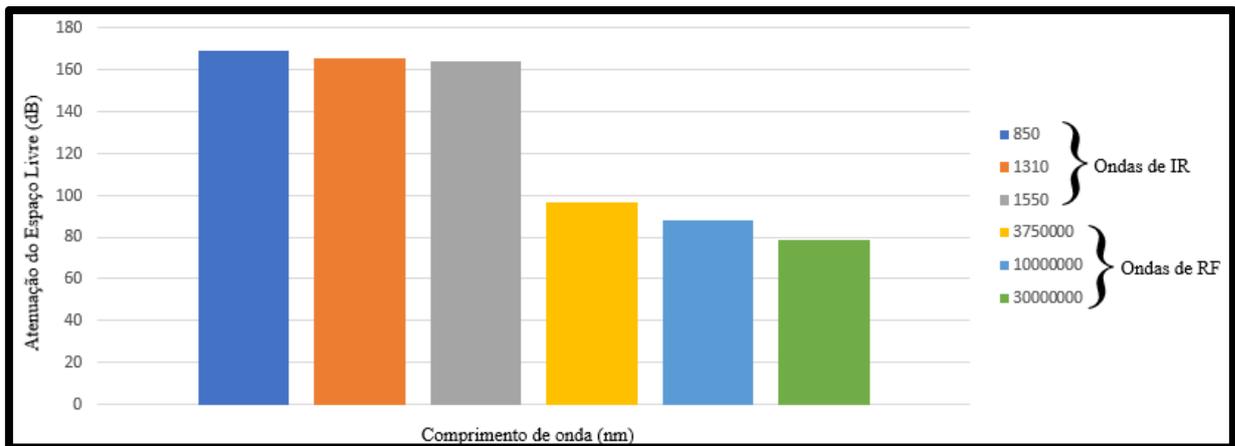
Onde λ é o comprimento de onda, em metros, e d é a distância em quilômetros. Como pode ser notada, sua ação aumenta com o quadrado da distância e decresce com o quadrado do comprimento de onda.

De forma a entender a influência deste efeito, foram selecionadas três frequências de antenas comerciais de comunicação ponto-a-ponto e calculados os seus respectivos comprimentos de onda, sendo estas de 10GHz (Commscope, 2022a), 30GHz (Commscope, 2023) e por fim 80GHz (Commscope, 2022b), com comprimentos de onda iguais a $2 * 10^7$ nm, $1 * 10^7$ nm e $0,375 * 10^7$ nm respectivamente.

Além disso, foram selecionados três comprimentos de onda do campo do IV utilizados para comunicação, os quais são 850nm, 1300nm e 1550nm (Fiber Mall, 2023).

Dada uma distância arbitrária de 20km, pôde-se montar um gráfico comparativo de atenuação dos comprimentos de onda de IV e MO de forma a facilitar a comparação. Os resultados serão convertidos na notação de decibel e estão expostos no gráfico 2.1.

Gráfico 2.1 - Comparativo de AEL entre IV e RF.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser notado, a diferença da potência na recepção do sinal chega a ser de mais 65dB, ou seja, aproximadamente 3.162.277,6 mais fracos. O que reforça a necessidade de trabalhar com equipamentos extremamente sensíveis e precisos.

Além disso, devem ser levados em consideração os efeitos que ocorrem na troposfera, nome da porção mais baixa da atmosfera, que é composta por cerca de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases, como argônio, dióxido de carbono e vapor de água (Timus, 2004).

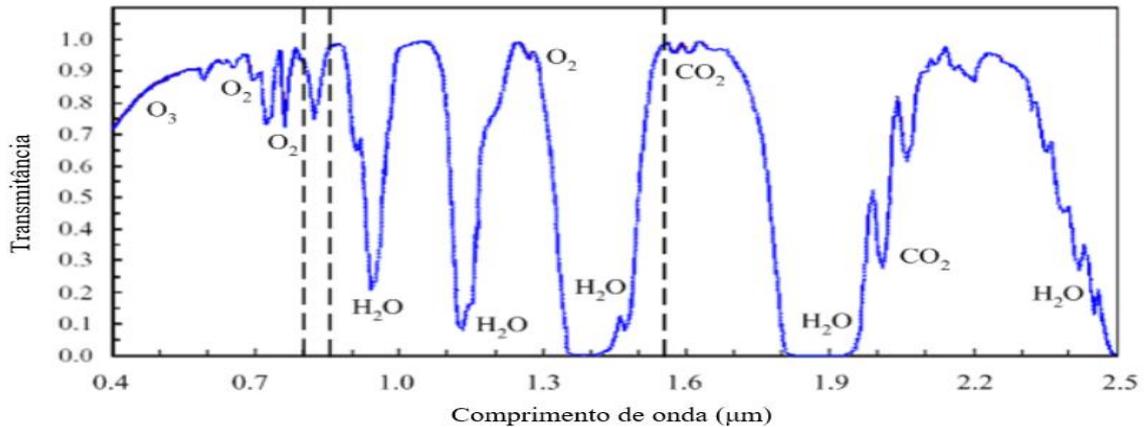
Estes componentes e as diferentes condições meteorológicas como neblina, chuva, tempestade de areia, neve, nuvens baixas e água líquida suspensa no ar, podem distorcer, espalhar ou absorver os sinais à medida que estes se propagam na atmosfera.

De forma a entender quais são estes efeitos, como ocorrem e posteriormente entender a forma de contornar estes problemas, cada um destes será apresentado nos próximos tópicos.

2.3.1.1 Absorção

A absorção de uma onda eletromagnética é um processo no qual a sua energia é convertida em outra forma, geralmente calor. Isso ocorre quando o sinal interage com átomos ou moléculas de um material, fazendo com que eles vibrem ou girem, e assim se perca potência, fazendo com que o sinal seja atenuado ou mesmo eliminado.

Os gases da atmosfera absorvem drasticamente a energia dos sinais na faixa do IV, sendo as partículas absorventes mais comuns a água, o dióxido de carbono e o ozônio (Timus, 2004). Um espectro de transmitância atmosférica típico é mostrado no gráfico 3.1.

Gráfico 3.1 –Transmitância média dos comprimentos de onda de 0,4 a 2,5 μm .

Fonte: Adaptado de Short, 2002.

A figura mostra que a absorção atmosférica é mais forte para algumas faixas de comprimento de onda por conta de suas interações com os componentes da atmosfera. Com base nela são constatadas janelas de transmissão de alguns comprimentos de onda.

É importante perceber que a atenuação diminui significativamente a absorção de um sinal, de modo que o receptor pode não receber os pulsos ópticos mesmo que esteja dentro do alcance esperado e, portanto, alcançar uma alta taxa de BER ou perda do link de comunicação, fazendo da escolha da portadora o primeiro aspecto a ser determinado.

Por conta do exposto e de outros fatores como o custo dos componentes necessários para gerar estas frequências, alguns valores passaram a ser mais utilizados, sendo eles os entre 0,8 e 0,85 μm e próximos a 1,3 μm e 1,55 μm , vale ressaltar que estes são utilizados em sistemas FSO (Timus, 2004).

2.3.1.2 Dispersão

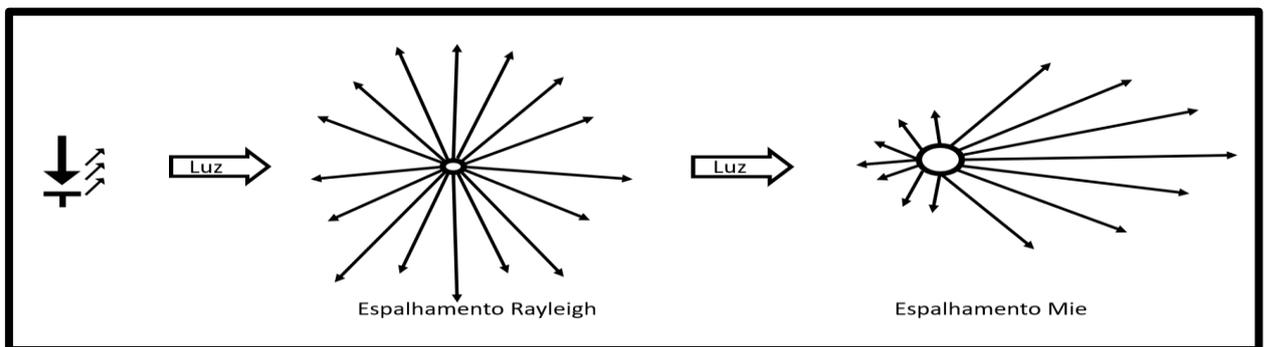
A dispersão é o processo pelo qual partículas na atmosfera espalham os sinais pelo espaço. Dependendo do tamanho das partículas existem vários regimes de dispersão, como a dispersão de Raman, de Rayleigh e de Mie, sendo as duas últimas as de relevância para a FSO (Timus, 2004).

A dispersão de Mie é o espalhamento de luz por partículas maiores, como as gotículas de chuva. Esta é mais influente em comprimentos de onda mais longos, ou seja, pode ser significativa para alguns comprimentos de onda IV, dependendo do tamanho das partículas de água na atmosfera.

Já a dispersão de Rayleigh é o espalhamento de luz por partículas menores que o comprimento de onda (Alqurashi et al., 2022). A dispersão Rayleigh é mais forte para comprimentos de onda IV mais curtos.

Nesta a intensidade da luz espalhada de forma quase uniforme, diferente da dispersão Mie, a qual envia a maior parte do sinal na direção da luz incidente (Timus, 2004). Além disso, partículas de espalhamento maiores diminuem a perda de intensidade da luz incidente causada pela dispersão de Mie. A figura 4.1 exemplifica o exposto.

Figura 4.1 – Dispersão Rayleigh e Mie.



Fonte: Elaborada pelo autor.

E a dispersão de Raman é o espalhamento de luz por moléculas que absorvem e reemitem a luz com uma frequência diferente. A dispersão de Raman é mais forte para comprimentos de onda mais longos, mas é um processo de pouca influência em FSO quando comparado as dispersões de Rayleigh ou Mie (Timus, 2004).

Tendo em mente os efeitos abordados, deve se levar em consideração a ocorrência de condições meteorológicas como névoa seca, névoa úmida, chuva, neve e nevoeiro. Estas acabam dispersando partículas na atmosfera e podem gerar dispersões com diferentes intensidades e tipos, de acordo com o tamanho e a quantidade de corpos suspensos e do comprimento de onda escolhida para transmissão (Ali; Ajel; Hussain, 2021).

A névoa seca, uma concentração de minúsculas partículas secas no ar atmosférico (Marinha do Brasil, 2015), é pouco influente devido a pouquíssima quantidade de elementos suspensos no ar, chegando a gerar aproximadamente 0,4dB/km de atenuação em alguns casos (Malik; Singh, 2015).

Já a névoa úmida, a qual apresenta grande quantidade de matérias sólidas em relação às gotículas de água, que são pequenas e dispersas, começa a influenciar um pouco

mais, pois o aumento de elementos no ar pode gerar atenuações de até 10dB/km (Malik; Singh, 2015).

A chuva ou a neve, por serem compostas de partículas maiores, acabam absorvendo menos a energia do IV, porém, geram dispersão considerável. Uma chuva com intensidade de 25 mm/hora pode apresentar um coeficiente de atenuação de 6 dB/km (Borwankar; Shah, 2021) e as mais intensas podem alcançar 19dB/km (Malik; Singh, 2015). Com relação a neve, pode-se ter atenuações de 13 a 96dB/km.

Deve-se levar em conta que este efeito de dispersão acaba se acumulando com o efeito de absorção e, por conta do tamanho do comprimento das ondas de IV, os quais são aproximadamente iguais aos de partículas de água em um nevoeiro, isso pode acabar gerando muita atenuação.

Uma atenuação maior acaba diminuindo significativamente o alcance do enlace, de modo que o receptor acaba não recebendo os pulsos ópticos e, portanto, nos leva a uma alta taxa de BER ou a perda de um link de comunicação.

Em alguns sistemas o fator de atenuação por conta de nevoeiros pode chegar a 100dB/km (Borwankar; Shah, 2021) ou mesmo acima de 300dB/km (Gouveia, 2007), ou seja, a perda de energia é alta e o pulso se degrada rapidamente (Timus, 2004).

A tabela a seguir apresenta o nível de atenuação de diversos tipos de condições atmosféricas em um comprimento de onda de 1550nm.

Tabela 3.1 – Relação de níveis de atenuação em links FSO de 1550nm.

Condição meteorológica	Precipitação (mm/hora)	Nível de atenuação (dB/km)
Céu limpo	-	0,155 ~ 0,233
Névoa Seca	-	0,441
Névoa Úmida	-	0,55 ~ 10,115
Chuva leve	~3	6,27
Chuva moderada	~12	9,64
Chuva forte	~100	8,68 ~ 19,28
Neve	-	13,73 ~ 96,8
Nevoeiro	-	15,55 ~ 309

Fonte: Compilado de Ali; Ajel; Hussain, 2021 e Gouveia, 2007.

Apesar do alto poder de atenuação, esta condição pode ser superada, como demonstrado no experimento dos engenheiros pelo Laboratório de Física Aplicada da Universidade *Johns Hopkins*. Que além dos resultados apresentados anteriormente, também conseguiram estabelecer comunicações em até 10km de distância, mesmo em condições de

baixa visibilidade, com alcance visual de 2 a 3km (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 2017).

Figura 5.1: Fotografia do transceptor da faculdade *Johns Hopkins* durante os testes.



Fonte: Adaptado de Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 2017.

Outro ponto importante a ser destacado o estudo realizado por Shaina e Gupta (2016), no qual realizaram simulações em enlaces com os comprimentos de onda de 850, 1310 e 1550nm, sofrendo algumas condições de atenuação.

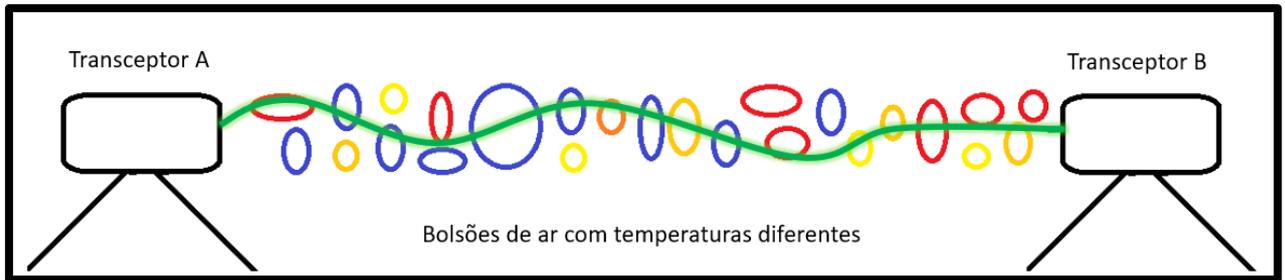
E foi possível verificar que o comprimento de onda de 1310nm, apesar de ter um alcance esperado menor, resistiu melhor as condições geradas pela simulação que o de 1550nm (Shaina; Gupta, 2016). Logo, seria interessante ter um sistema que operasse em 1550 e 1310nm, de forma a aproveitar as características de alcance em distância e resistência as condições climáticas de cada um desses feixes.

2.3.1.3 Turbulência

Como o problema acima está relacionado a quantidade de umidade no ar, é possível imaginar que um clima seco e quente pode parecer o melhor para um sistema FSO, porém, estas condições geram um efeito atmosférico chamado de turbulência (Timus, 2004).

Conforme o Sol esquenta o ar, algumas porções da atmosfera se aquecem mais do que outras, formando bolsões, os quais vão ter índices de refração diferentes.

Figura 6.1 - Efeito de desvio por conta de turbulência



Fonte: Elaborada pelo autor.

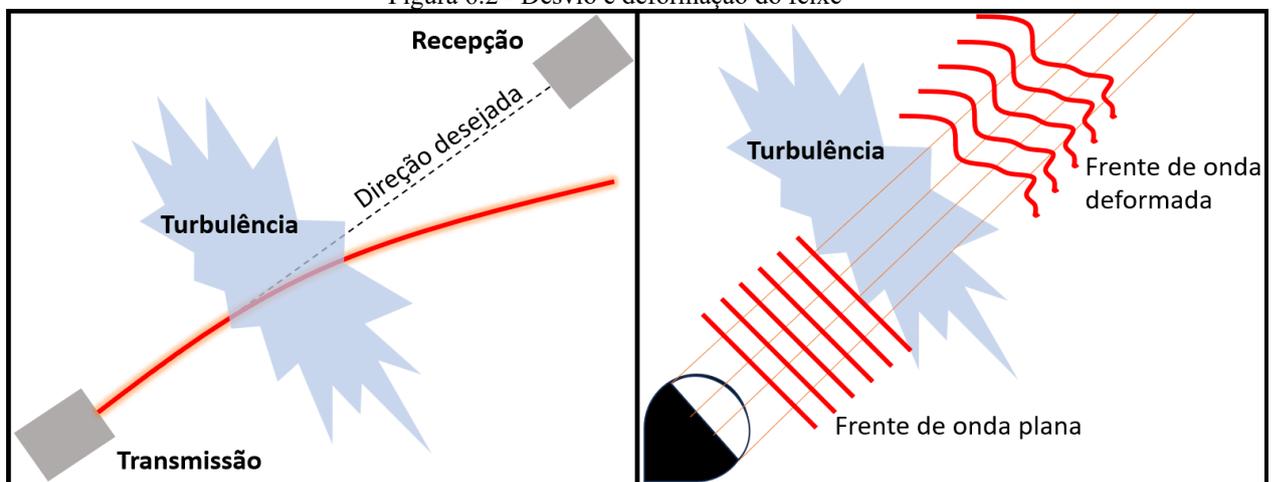
Os feixes de laser experimentam três efeitos sob turbulência: cintilação, deslocamento do feixe e espalhamento do feixe. Os efeitos de cintilação atmosférica podem ser observados até mesmo a olho nu, ao se observar uma estrela no céu noturno pode se perceber uma rápida troca de cores, que variam entre o azul, branco e vermelho. Os efeitos da cintilação podem fazer com que diferentes partes de um feixe laser percorram caminhos ligeiramente diferentes, deformando a frente de onda.

Quando o sinal é recombinado na recepção gera uma superposição, a qual pode ser destrutiva ou construtiva, resultando em perdas momentâneas do sinal, o que pode degradar o desempenho do sistema (Timus, 2004).

O deslocamento, ou deriva, é um movimento aleatório devido à turbulência atmosférica que pode causar um apontamento para fora da área do receptor, o que resulta em perda de sinal.

Já o espalhamento é o aumento do diâmetro do feixe laser devido à turbulência atmosférica. Ele pode causar a perda de comunicação por diminuir a densidade de potência irradiada por área à medida que o diâmetro do feixe aumenta.

Figura 6.2 - Desvio e deformação do feixe



Fonte: Elaborada pelo autor.

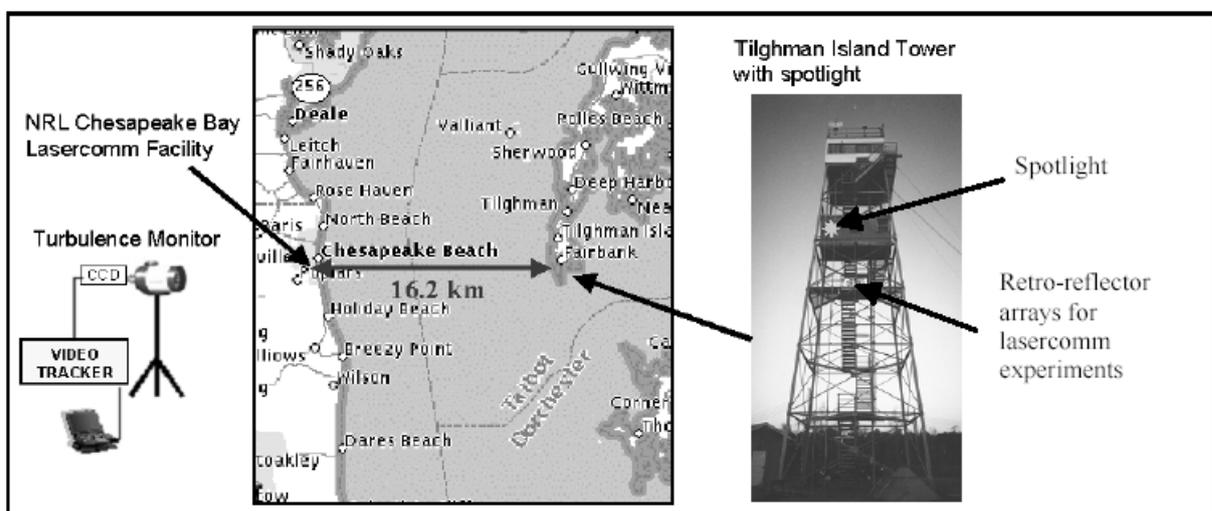
A turbulência pode ser reduzida usando técnicas de equalização de sinal ou usando comprimentos de onda mais curtos (Timus, 2004). Os comprimentos de onda mais curtos são menos afetados pela turbulência porque as mudanças no índice de refração são menores para comprimentos de onda menores.

O Laboratório de Pesquisa Naval (NRL) realizou vários testes na Baía de Chesapeake e um desses foi para determinar os níveis de turbulência em um caminho de 16,2 km através desta baía (Stell et al., 2004).

Os resultados do experimento mostraram que os níveis de turbulência eram variáveis e tipicamente maiores no meio da tarde e menores após o nascer ou o pôr do sol. Os níveis de turbulência também eram maiores perto da superfície e menores com a altitude.

Os resultados do experimento também mostraram que a comunicação a laser seria possível na Baía de Chesapeake, mesmo em condições de turbulência moderada. No entanto, a taxa de erro de bits aumentava com o aumento do nível de turbulência.

Figura 6.3 - Medição da turbulência na Baía de Chesapeake



Fonte: Adaptado de Stell et al., 2004.

Já em relação a um navio de guerra, além dos fatos anteriormente expostos, também devem ser consideradas as superfícies dos conveses abertos, os quais são feitos de metal e absorvem a radiação solar, fazendo com que sejam aquecidos. Estes, por sua vez esquentam o ar próximo a eles e, devido ao efeito de convecção, geram circulações turbulentas (Max, 2012) o que causa cintilação (Timus, 2004).

Este problema pode ser mitigado caso a instalação do dispositivo de comunicação por meio de FSO seja feita em um local mais alto, como o mastro (Timus, 2004).

2.3.2 Limitações inerentes ao sistema

Como pautado anteriormente foram levantados alguns elementos como a necessidade de linha de visada e precisão direcional, segurança quanto a exposição e o efeito dos movimentos do navio em sistemas que exigem apontamento.

Estes pontos serão apresentados e explicados nas próximas seções.

2.3.2.1 Line of Sight - Linha de visada (LOS)

Para que seja possível estabelecer um link FSO o transmissor e o receptor devem ter um ao outro dentro de um alcance visual (Sugumaran et al., 2022). Qualquer objeto ao passar por um feixe laser é capaz de obstruí-lo, mesmo que seja pequeno, e levar a obstruções temporárias no link ótico.

Em relação à implementação da tecnologia FSO em plataformas de navios, os maiores problemas de LOS ocorrem com obstruções maiores, como ilhas ou estruturas superiores de outras embarcações, que dependendo da altura, bloqueiam parcialmente ou totalmente a transmissão.

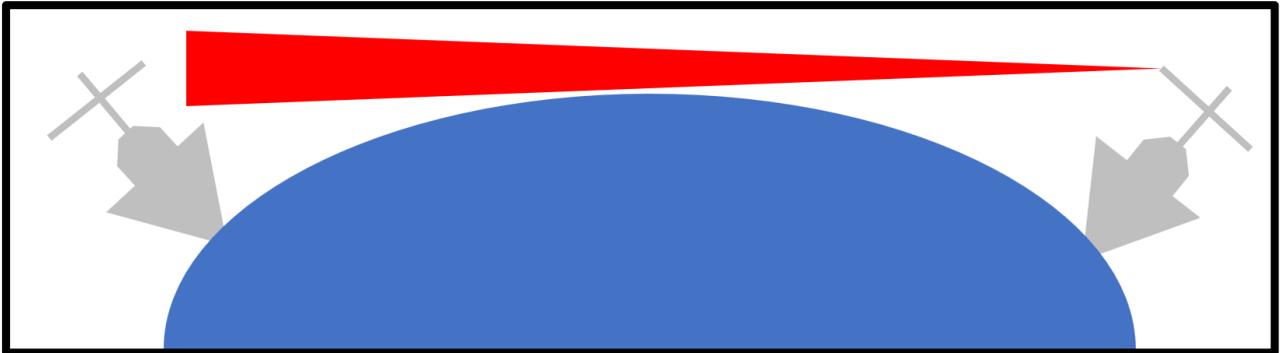
O alcance máximo para dois navios se comunicarem pode ser verificado através do cálculo da linha de visada, ou horizonte visual, de cada meio. Esta depende da altura onde um transmissor FSO está localizado (Timus, 2004).

Para calcular esta distância de forma aproximada e suficiente, pode ser usada a fórmula:

$$dl = 2 * \sqrt{ho}$$

Onde “dl” é a distância do observador até o limite de seu horizonte visual e “ho” é a distância vertical do nível do mar de um observador (Timus, 2004). O cálculo é realizado para os dois meios e a soma dos dois resultados resulta no alcance máximo. Por exemplo, esta pode chegar a 32km para transmissores a 20m de altura acima do nível do mar.

Figura 7.1 - Ilustração de dois navios se comunicando por laser em LOS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que esta é uma condição mandatória e que, por enquanto, não há como contorná-la.

2.3.2.2 Precisão Direcional

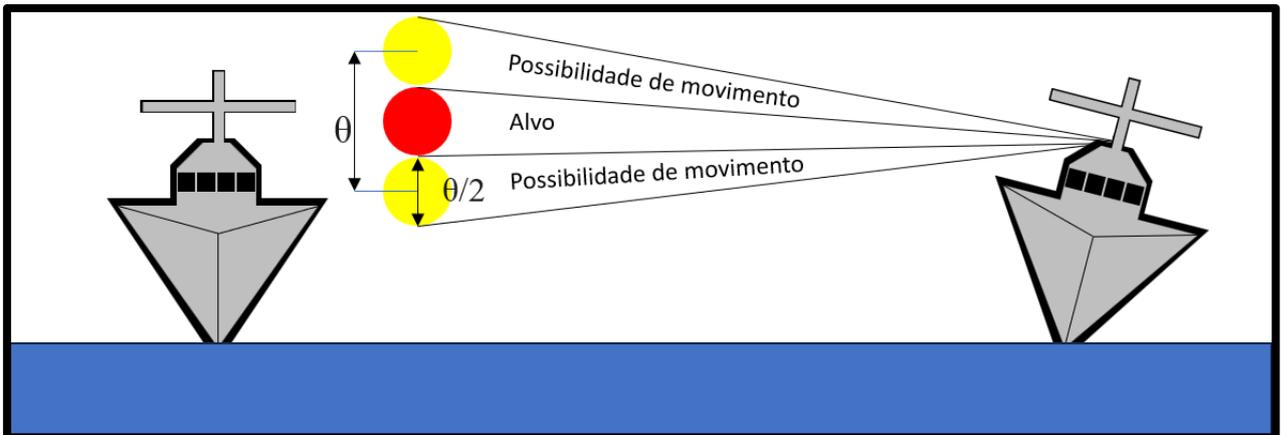
O uso de feixes estreitos aumenta a densidade da potência de transmissão em um ponto e possibilita comunicações FSO a longas distâncias, porém, por serem estreitos, geram uma área de cobertura pequena, conforme demonstrado na seção 2.2.1, e isso torna o apontamento entre transceptores numa difícil tarefa, ainda mais quando se considera os navios em movimento.

Para resolver esta intempérie os transmissores devem se ajustar de acordo com os movimentos do próprio navio, para assim manter o link ativo, ou seja, deve fazer uso de mira ativa para fazer os ajustes necessários de apontamento nos transceptores (Timus, 2004).

Para isso deve ser levada em conta a precisão destes ajustes, a chamada precisão direcional. Esta característica indica a capacidade de deslocamento mínimo, em graus, de um equipamento, o qual afeta diretamente a resolução do ajuste de apontamento (Timus, 2004).

Considerando a situação abaixo, tem-se o seguinte problema, dois navios estão utilizando um canal em IV para se comunicar. Está sendo utilizado um laser com divergência de $\theta/2$ de precisão direcional de θ , e um deles perdeu o apontamento e precisa fazer uma correção, conforme ilustrado na abaixo.

Figura 8.1 - Padrão de feixe com resolução de apontamento de θ .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta situação não é possível chegar a uma resolução de apontamento pois o feixe laser precisaria ser deslocado em $\theta/2$, mas só pode ser deslocado θ , o que impede a comunicação. Para resolver este problema deve-se considerar que a divergência do feixe nunca deve ser menor que a precisão direcional (Timus, 2004).

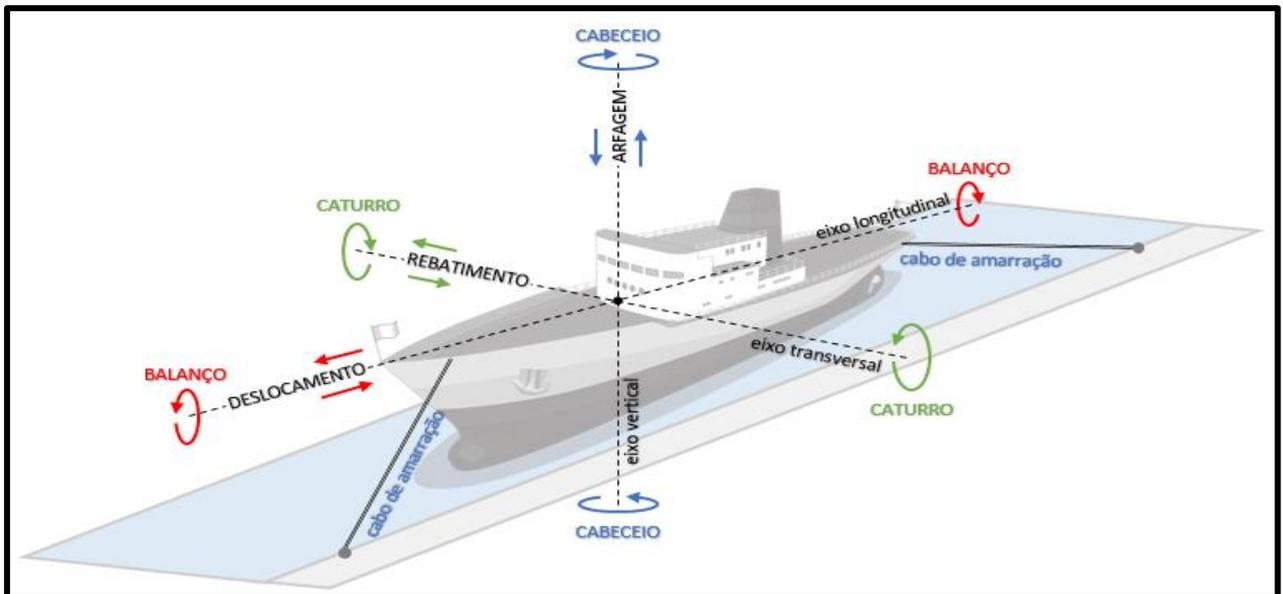
Uma solução interessante para este problema seria a uso de um sistema de ângulo de divergência variável, como o modelo avaliado por Zhang et al (2023), que propôs diversos sistemas, um deles com capacidade de variar este ângulo de $0,04^\circ$ a $0,11^\circ$, o qual permitiria ajustar a abertura do feixe para atender o enlace em longas e curtas distâncias.

2.3.3 Os movimentos realizados por navios

Estando em deslocamento ou atracado em um cais, os navios estão o tempo todo em movimento. Esta instabilidade se dá pelo constante deslocamento das porções de água, que compõe o mar, e das massas de ar, em forma de vento, as quais interagem com a estrutura do navio.

Para entender esta dinâmica, deve-se compreender os graus de liberdade de um meio náutico nos eixos vertical, longitudinal e transversal. A figura abaixo descreve os eixos e os movimentos atribuídos a eles.

Figura 9.1 - Eixos de liberdade de movimento de um navio.



Fonte : Trindade, 2019.

Observando o eixo longitudinal é possível perceber dois movimentos atrelados a ele, o balanço e o deslocamento. Balanço é movimento giratório no eixo longitudinal que provoca um tombo ora a bombordo e ora a boreste. O deslocamento é a possibilidade de avançar ou regredir no sentido do eixo longitudinal (Trindade, 2019).

No eixo transversal ocorrem o caturro e o rebatimento. O caturro é o movimento giratório no eixo transversal que provoca o levantamento da proa e conseqüente afundamento da popa e vice-versa. E o rebatimento é o deslocamento lateral do navio no plano da linha d'água, fazendo com que o meio possa deslizar para a esquerda ou para a direita (Trindade, 2019).

E no eixo vertical se tem o cabeceio e a arfagem, sendo esta a possibilidade de realizar subidas e descidas em função da influência das ondas do mar, pela variação das marés ou deslocamento de grandes corpos em águas próximas. Já o cabeceio é a capacidade de girar envolta do eixo vertical (Trindade, 2019).

Os movimentos apresentados podem ocorrer de forma voluntária, ou seja, o navio se deslocando para frente ou para trás ou mesmo realizando uma guinada, ou de forma involuntária, por conta das condições de mar e vento, e podem ocorrer isoladamente ou todas ao mesmo tempo (Timus, 2004).

Por conta disso o apontamento de um sistema FSO é uma tarefa difícil, mas não é algo impossível, tendo em vista que os navios possuem antenas estabilizadas de comunicação por satélite que precisam realizar este tipo de tarefa.

Sendo assim, pensar em um robusto sistema de manutenção de estabilidade em três eixos será uma base sólida para que os links possam se manter durante manobras ou condições de mar adversas.

2.3.4 Segurança do laser

Desde que os dispositivos laser começaram a aparecer em laboratórios, a segurança tem sido uma fonte de discussão. As duas principais preocupações são: exposição humana a feixes laser e alta voltagem dentro dos sistemas laser e suas fontes de alimentação, e em tecnologias FSO isso não é diferente (Timus, 2004).

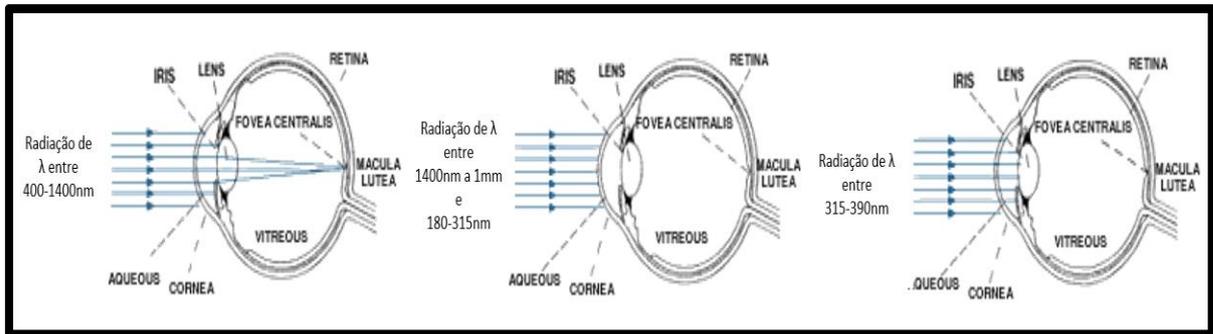
A palavra LASER é um acrônimo que significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, em português, amplificação de luz por estímulo de emissão de radiação. Estes produzem um feixe de luz intenso e altamente direcional.

O olho humano é extremamente sensível à intensidade de radiação IV de um laser e pode ser danificado de forma temporária ou permanente por feixes diretos ou refletidos. A exposição ocular ao laser será parcialmente absorvida, elevando a temperatura da superfície ou do interior, podendo causar uma lesão ou deformação (Laser Institute of America, 2004).

Em certas circunstâncias, a exposição ao laser pode resultar em danos à pele, porém, o olho humano é mais vulnerável a lesões do que a pele humana, já que a córnea, superfície externa clara do olho, não possui uma camada externa de células mortas para protegê-la.

De acordo com as informações de segurança de laser do Laser Institute of America (2004), nas regiões do ultravioleta, luz visível e IV, o olho absorve a energia do laser de diferentes maneiras e pode ser danificado em locais diferentes, dependendo da exposição.

Figura 10.1 - Absorção do olho a diferentes comprimentos de onda site LIA



Fonte: Modificado de Laser Institute of America, 2004.

A região de risco retiniano do espectro óptico está aproximadamente entre 400 e 1400nm, ou seja, é próxima das frequências utilizadas em sistemas FSO. Porém, tecnologias que utilizam comprimento de onda de 1550nm pode transmitir com segurança considerável.

A informação acima pode ser confirmada com a tabela 4.1, a qual mostra o limite de Exposição Permissível Máxima (MPE) para visualização sem proteção com diferentes comprimentos de onda (Nykolak; Paulson; Tourgee, 1999).

Tabela 4.1 – Limite de exposição máxima por comprimento de onda

Comprimento de onda	750 nm	850 nm	1310 nm	1550 nm
Máxima permissividade a exposição	1.2 mW / cm ²	2.0 mW / cm ²	40 mW / cm ²	100 mW / cm ²

Fonte: Adaptado de Nykolak; Paulson; Tourgee, 1999.

Como se sabe que sistemas FSO operam com comprimentos de onda de 850, 1310 e 1550nm, pode ser percebido que tecnologias que em 1550nm pode-se transmitir com segurança 50 vezes mais potência óptica do que o comprimento de onda de 850nm sem danificar o olho humano, podendo assim ter um alcance maior sem expor o pessoal a danos (Nykolak; Paulson; Tourgee, 1999).

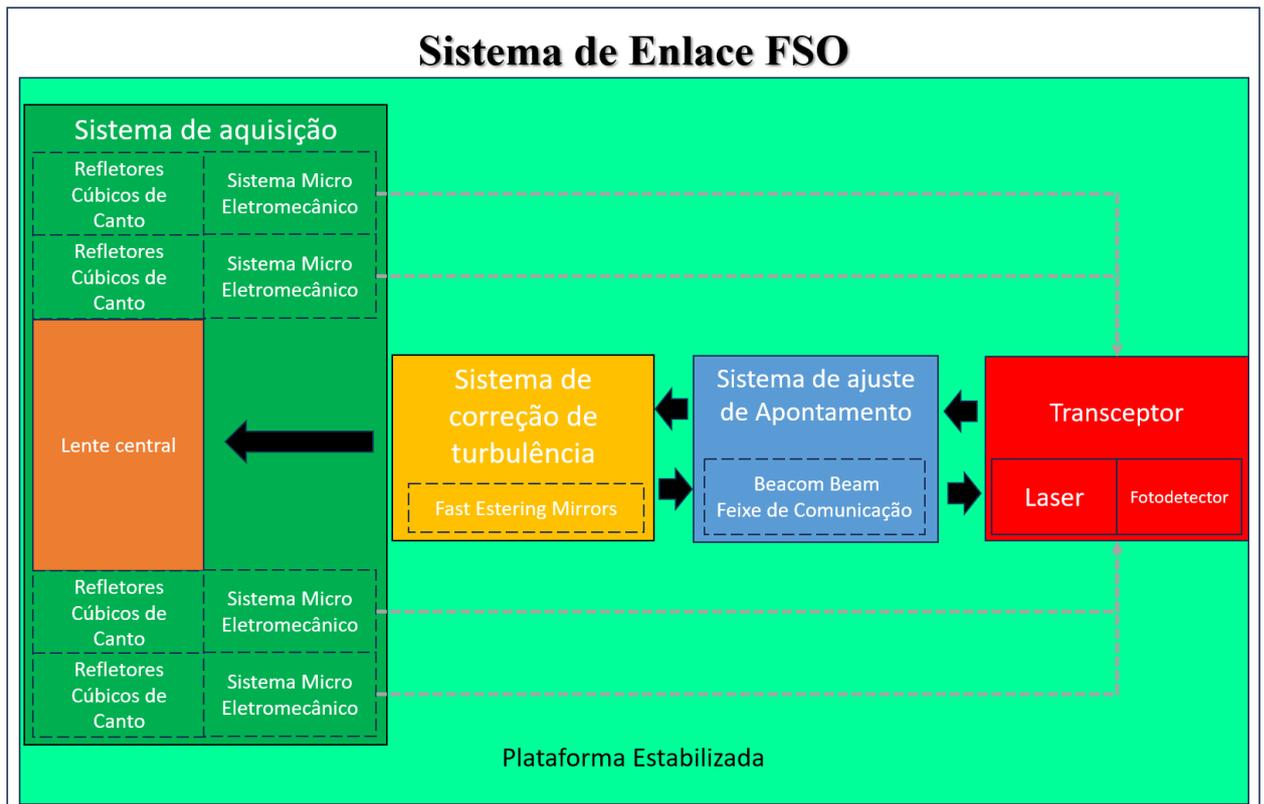
Neste caso, como em um navio se tem pessoal circulando pelos convés externos, os quais podem sofrer com estas emissões, outra maneira de prevenir acidentes, além da escolha do comprimento de onda adequado, será a prevenção. A instalação de sinalização, execução de palestras e geração de procedimentos operacionais formais, obedecendo as recomendações de exposição são necessários e ajudam a prevenir acidentes.

2.4. Modelo em análise

A proposta de Timus (2004) abordou as partes do sistema com base nos problemas a serem resolvidos, dividindo a sua tese em etapas de aquisição, de acompanhamento e de apontamento. Em seguida dissertou sobre o processo de como realizar ajustes para superar as condições meteorológicas e determinou que o sistema precisaria de uma plataforma estabilizada.

Este processo de descrição não foi organizado ou consolidado por Timus (2004) em nenhuma abstração, porém, de forma a facilitar o entendimento do funcionamento de cada uma das partes foi construído um diagrama de blocos, apresentado na figura 11.1, o qual será explicado a seguir.

Figura 11.1 - Diagrama de blocos do modelo de sistema FSO



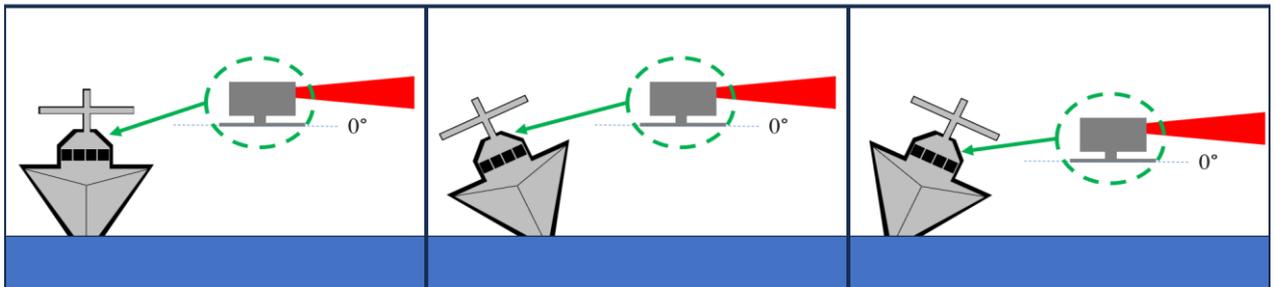
Fonte: Elaborada pelo autor.

A "Plataforma Estabilizada", elemento base deste sistema, tem como função principal manter o transceptor alinhado com o nível do mar, de forma a facilitar os cálculos necessários a manutenção do link. As manutenções necessárias são correções devido ao deslocamento do receptor, as movimentações do próprio navio e em detrimento da ocorrência

involuntária de movimentos nos eixos de liberdade do navio, que ocorrem por conta do mar e do vento.

Seu funcionamento se dá pela movimentação em três eixos de liberdade, os quais são ajustados para realizar as tarefas descritas acima. A figura 11.2 exemplifica essa ação.

Figura 11.2 - Comportamento de uma plataforma estabilizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma outra função deste elemento seria a de alinhar o transceptor de um navio com o de outro, assim possibilitando que estes elementos se enxerguem e possam estabelecer enlace. Vale ressaltar que uma pequena margem de erro pode e deve ser tolerada, tendo em vista que esta será corrigida por um outro elemento o qual ainda vai ser apresentado.

O “Sistema de Aquisição” realiza as atividades de aquisição, permite o ajuste de potência e também o rastreamento, ações necessárias para manutenção da conexão e do enlace.

A etapa de aquisição é a tarefa na qual dois terminais fazem uma varredura com o objetivo de localizar um ao outro para poderem apontar corretamente seus dispositivos. Vale ressaltar que em plataformas fixas esta não ocorre, pois, para esses elementos se comunicarem é necessário que um deles conheça a posição do outro antes de estabelecer comunicação (Alqurashi et al., 2022), como é o caso da interação entre satélites geoestacionários e estações terrenas.

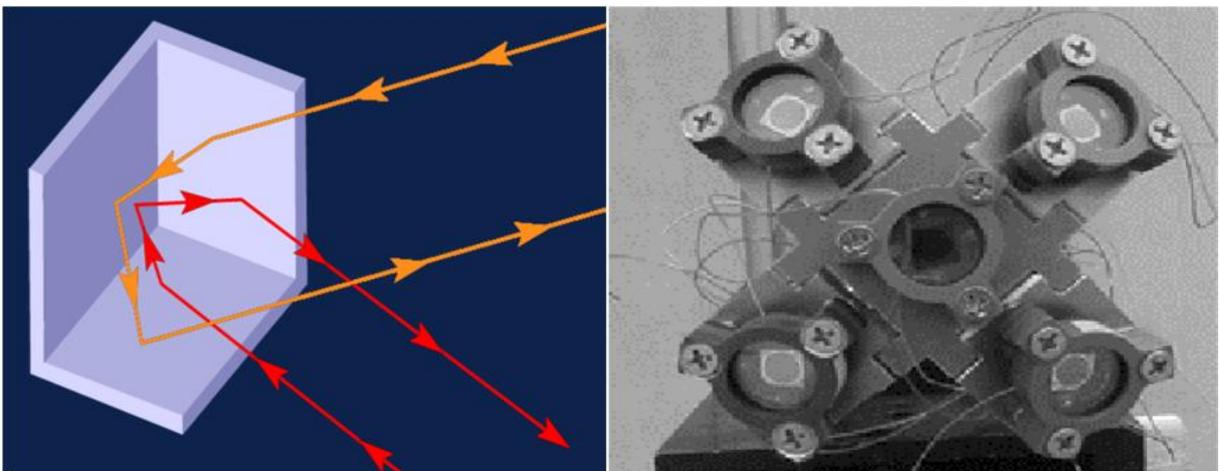
No entanto, se tratando de navios, isso não é trivial, por conta de os meios estarem em contante locomoção e, especialmente, por conta dos movimentos de balanço, caturro, cabeceio, arfagem, deslocamento e rebatimento, os quais podem ocorrer de forma involuntária e sem qualquer previsibilidade. Estes movimentos podem impedir uma conexão ou mesmo fazer com que se perca a já estabelecida, o que impede o uso de sistemas com base em posições fixas.

A solução adotada no modelo para localizar o navio alvo foi o emprego de um “Sistema de Ajuste de Apontamento”, o qual permite ajustar a divergência para empregar um *Beacom Beam*, ou, feixe de farol, que tem uma divergência de feixe muito maior que o feixe de

comunicação normal (Timus, 2004). Este feixe seria propagado através de um elemento central no transmissor e detectado através de elementos chamados de Refletores Cúbicos de Canto (CCR) (Timus, 2004).

Estes dispositivos são compostos de três espelhos ortogonais, um desses espelhos pode ser movido através de um Mecanismo Micro Eletromecânico (MEM), para ligar ou desligar os CCR, enquanto os outros dois espelhos permanecem fixos, e, usando o princípio da reflexão, refletem a luz incidente de volta à fonte transmissora. A figura abaixo apresenta os componentes em pauta.

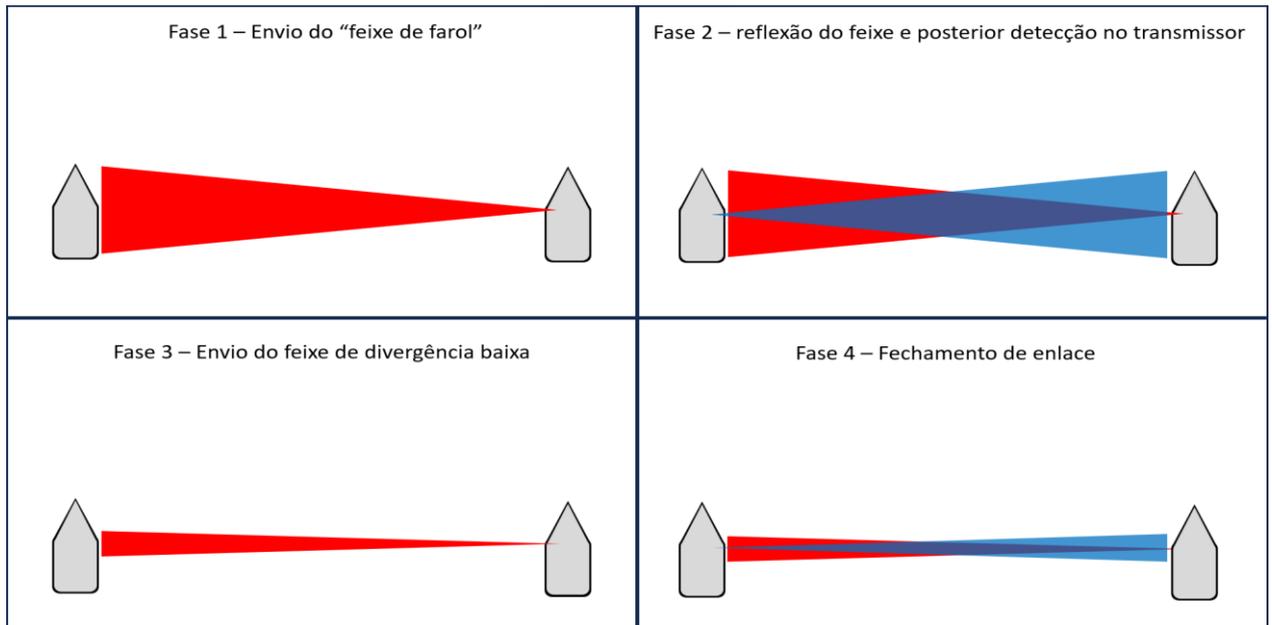
Figura 11.3 A esquerda o CCR e a direita um transceptor com quatro CCR.



Fonte: Compilado de Tumarkin, 2017 e Rabinovich et al., 2005, respectivamente.

O feixe de farol é refletido de volta à fonte quando o CCR está ligado, assim o transmissor detectará a localização do receptor e mudará de feixe de farol para feixe de comunicação. Ao receber o feixe estreito, o receptor desativa os seus CCRs e transmite o seu feixe de comunicação permitindo o estabelecimento de um link. O procedimento pode ser mais bem entendido na figura 11.4.

Figura 11.4 - Fases necessárias para executar a aquisição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Concluída a aquisição se inicia o processo de ajuste de potência, no qual deve-se controlar a intensidade do feixe. Esta etapa tem um alto grau de complexidade, por conta dos movimentos de distanciamento e aproximação das plataformas e a pequena divergência dos feixes laser.

Enquanto se ajusta a intensidade do laser, deve ser realizado o processo de rastreamento, o qual vai detectar o deslocamento relativo do meio com quem se quer manter o enlace e permitir ajustes no apontamento.

Como o transmissor deve ser apontado com precisão para garantir um nível de energia suficiente no receptor, a resolução de apontamento deve ser cuidadosamente calculada para não ficar abaixo do mínimo necessário e nem ultrapassar os limites de recepção, o que também pode impedir a comunicação.

Para resolver esta intempérie devem ser acompanhados os parâmetros de recepção e realizadas correções na transmissão, podendo ser ajustadas a divergência dos feixes, as potências dos lasers e a posição dos transceptores.

Realizando estas ações de forma correta pode-se buscar um apontamento contínuo, deslocando o feixe de acordo com a velocidade da plataforma transmissora e a localização do receptor.

Outro ponto importante a ser considerado é a frequência de rastreamento, a qual refere-se ao tempo mínimo em que o terminal FSO precisa coletar a localização do receptor e

determinar a posição e velocidade relativas do receptor. Estas vão determinar as alterações a serem feitas na direção do feixe laser.

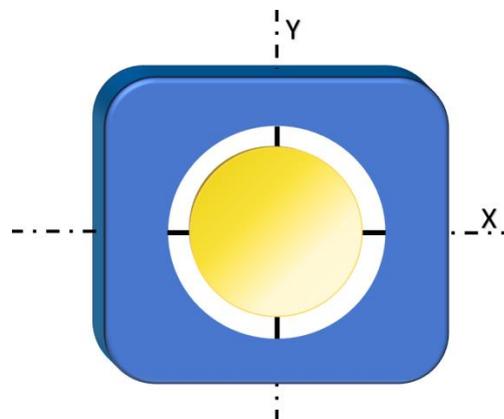
Para calcular a frequência de rastreamento necessária, Timus (2004) utilizou como bases de cálculo, meios com velocidade máxima de 35 nós, ou 64,42km/h, e uma distância de 500m, a qual pode ser considerada como um afastamento razoável devido a quesitos de segurança na execução de manobras. Estes dados de velocidade e mínima distância segura ainda coincidem com os parâmetros atuais.

Com os dados acima Timus (2004) demonstrou que o sistema teria de conseguir desempenhar uma resposta em frequência com taxa de 38,4Hz, ou seja, a cada 0,026 segundos o sistema deve realizar correções.

Somente o sistema mecânico da plataforma estabilizada poderia atender a um movimento linear, porém, para ter uma resposta muito superior e mais precisa, deve ser utilizado um outro dispositivo. Este será utilizado para corrigir os pequenos ajustes de apontamento e, além disso, também efetuará correções de desvios de feixe por influência de turbulência atmosférica, outro fator que limita a estabilidade e a qualidade dos enlaces FSO (Timus, 2004).

O componente em pauta é o *Fast Steering Mirror* (FSM), ou Espelho de Direção Rápida, o qual é uma a peça-chave do “Sistema de correção de turbulência”. Ele é um pequeno espelho, que pode se movimentar em dois eixos, em um baixo tempo de resposta, com soluções comerciais atingindo um intervalo de até 20ms, ou 50Hz, por passo, podendo se deslocar com um ângulo mínimo de $1\mu\text{rad}$ ($0,000057^\circ$) e com um limite de até 2° nas direções positivas e negativas de cada eixo (Physik Instrumente GMBH & CO. KG, 2021).

Figura 11.5 - Representação de um FSM e seus eixos de liberdade de movimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A implementação deste componente poderia auxiliar na correção de uma parte significativa das flutuações da posição do ponto focal causadas pela turbulência atmosférica e possibilitar um aprimoramento no rastreamento (Suite et al., 2004).

Além dessa função, este elemento poderia ser usado para realizar pequenas correções estimuladas por pequenos movimentos dos navios, possibilitando assim correções rápidas e precisas sem a necessidade de movimentar o transceptor (Timus, 2004).

Já com relação ao laser e ao fotodetector, tendo em vista os dados sobre perda de potência pela atenuação do espaço livre e fatores climáticos, e por conta da segurança a exposição dos olhos dos usuários, fica evidente, que se deve optar por equipamentos sintonizáveis, os quais possam operar com comprimentos de onda de 1310 e 1550nm.

Isto permitiria ao sistema de comunicação aproveitar as características dos dois comprimentos de onda em relação das condições enfrentadas pelos equipamentos, sejam elas a distância entre os elementos, ou mesmo as condições atmosféricas do dia (Shaina; Gupta, 2016).

Com este modelo o autor pretendia mostrar a possibilidade de construir um sistema de comunicação capaz de operar no mar, com significativa capacidade de resistência as condições climáticas e com capacidade esperada de um link comercial da época, de 2,5Gbps, o que até mesmo nos dias de hoje é considerada uma alta taxa de transmissão.

3 METODOLOGIA

A metodologia de uma monografia descreve o conjunto de métodos, técnicas e procedimentos utilizados para conduzir uma pesquisa e responder às questões ou objetivos estabelecidos.

“A palavra metodologia vem do grego: *metá* que significa através de, a seguir; *hodós*, caminho; e *logos*, estudo.” (Rodrigues, 2011, p.12)

Esta desempenha um papel crucial, pois fornece a base para a validade e confiabilidade dos resultados apresentados. A metodologia auxilia o leitor a entender como o estudo foi realizado e como os dados foram coletados, analisados e interpretados.

3.1 Classificação da Pesquisa

De acordo com Vergara (1998), existem diferentes tipos de classificação de pesquisas. Porém, ela define dois critérios basilares, sendo eles quanto aos fins e quanto aos meios.

Dentro destes dois grupos existem diversos enquadramentos (Vergara, 1998) e, de forma a permitir uma melhor compreensão deste trabalho, os mesmos foram classificados a seguir.

3.1.1 Quanto aos fins

Para poder classificar este artigo devem ser levados em consideração as seguintes informações.

“A investigação exploratória é realizada; em área na qual há pouco conhecimento acumulado e sistematizado. Por sua natureza de sondagem, não comporta hipóteses que, todavia, poderão surgir durante ou ao final da pesquisa.

A pesquisa descritiva expõe características de determinada população ou de determinado fenômeno. Pode também estabelecer correlações entre variáveis e definir sua natureza. Não tem compromisso de explicar os fenômenos que descreve, embora sirva de base para tal explicação.” (Vergara, 1998, p. 45)

Com base no exposto deve-se levar em consideração o fato que existem diversos estudos na área de FSO, para as mais diversas aplicações, porém, quando se trata da exploração desta em navios, a realidade não é a mesma por conta do mercado restrito e das diversas dificuldades a serem superadas.

Sendo assim há pouco conteúdo de acesso livre publicado sobre o assunto, e esta monografia foi uma oportunidade de se estudar este ramo específico da FSO, buscar inovações na área e possibilitar trazer conhecimento destes elementos para a língua portuguesa.

Logo, esta pesquisa possui características tanto de investigação exploratória quanto de pesquisa descritiva.

3.1.2 Quanto aos meios

Na construção desta monografia foram consultados diversos jornais digitais, trabalhos acadêmicos, manuais de equipamentos e sites especializados no intuito de melhor explicar as definições necessárias e justificar as tomadas de decisão.

Esta metodologia se alinha a pesquisa bibliográfica, a qual é uma abordagem de condução de estudos acadêmicos onde se realizam análises e revisões críticas de fontes literárias, artigos científicos, livros e outros materiais impressos ou digitais relacionados ao tema de pesquisa (Gil, 2002). Estas fornecem instrumentos analíticos para qualquer outro tipo de pesquisa e podem gerar conclusões sobre elas mesmas (Vergara, 1998).

3.2 Limitações do Método

A pesquisa encontrou algumas dificuldades que limitaram as conclusões que se podia chegar e isso se deve ao fato de existirem poucas fontes públicas na área de interesse.

Como o trabalho em análise poderia carecer de melhorias e atualizações foram buscadas soluções em várias áreas que utilizam tecnologias FSO para enviar, receber ou tratar dados, o que permitiu verificar se foi deixado algum problema não sanado, se os métodos de sobrepujar as dificuldades ainda eram efetivos e se as informações expostas ainda condiziam com a realidade.

Porém, não se tem estudos que juntem todas estas peças e as apliquem em componentes de comunicações navais, restringindo assim as melhorias a sugestões.

3.3 Coleta e Tratamento de Dados

Foram consultadas diversas fontes especializadas no campo da ótica e de FSO de forma a obter o máximo de informações sobre essa tecnologia tal como seu funcionamento e as suas limitações.

Em seguida, buscou-se verificar as soluções adotadas neste campo para superar as dificuldades e melhorar a eficiência destes sistemas. Com isso, foi possível fazer todas as exposições das seções anteriores e permitiu que se chegasse a algumas conclusões, as quais estão expostas nas próximas seções.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Antes de avaliar os elementos escolhidos e apresentar as críticas ao modelo exposto na subseção 2.4, é importante levar em consideração que a tese em análise foi apresentada em 2004, e muitos avanços tecnológicos foram alcançados nestes 19 anos de estudos e desenvolvimento.

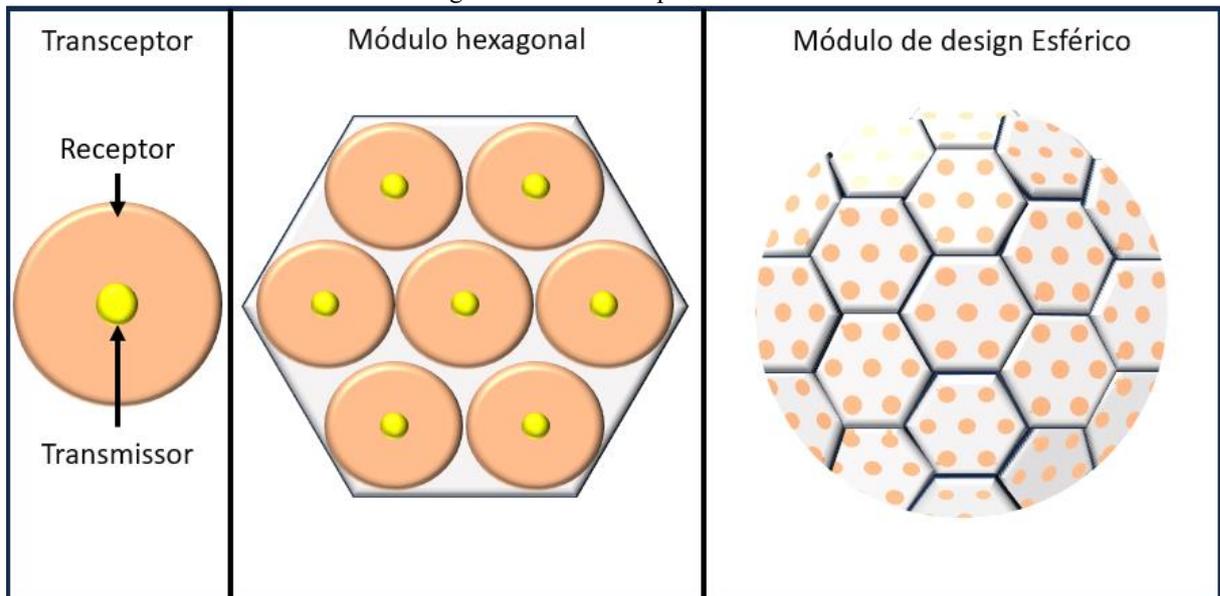
Esta evolução pode ser observada ao considerar que as tecnologias FSO comerciais apresentadas na época tinham velocidades de 2,5Gbps (Timus, 2004) e, atualmente, podem atingir de 30Gbps (EC System International, 2023a) a 40Gbps (Viasat, 2023b), como já comentado neste estudo.

Para poder gerar as avaliações, foram escolhidos alguns pontos de análise e buscados alguns artigos e equipamentos, os quais pudessem trazer melhorias ou demonstrar que a medida adotada ainda seria uma boa opção.

Sendo assim, o primeiro ponto de análise será a plataforma estabilizada. Alguns meios navais modernos possuem sistemas de estabilização que reduzem o impacto dos movimentos nos três eixos de liberdade, porém, eles não conseguem compensá-los em sua totalidade, principalmente em condições severas de mar, em velocidades elevadas de deslocamento ou durante a execução de manobras bruscas. Por conta disto, manter dois componentes que precisam estar em linha de visada ainda precisa de estabilização.

Porém, estão sendo projetados módulos de design esférico com capacidade de transmissão e recepção em 360°. Eles seriam compostos por diversos transceptores organizados em pequenos hexágonos e agrupados na forma de uma esfera (Al-Gailani et al, 2021). A figura 12.1 traz uma representação da ideia.

Figura 12.1 - Transceptor Esférico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este tipo de módulo eliminaria a necessidade de uma plataforma estabilizada, porém, poderia comprometer a mais qualitativa característica deste tipo de comunicação, a discricção. Ao se transmitir indiscriminadamente em todas as direções se abririam portas a possibilidade de detectação de uma fonte de emissão anormal de IV.

De forma a encontrar outras opções, foram avaliados alguns trabalhos sobre a construção de sistemas em outras plataformas, tais como edifícios (Al-Gailani et al, 2021), drones (Park et al., 2022) e trens de alta velocidade (Kaymak et al., 2018).

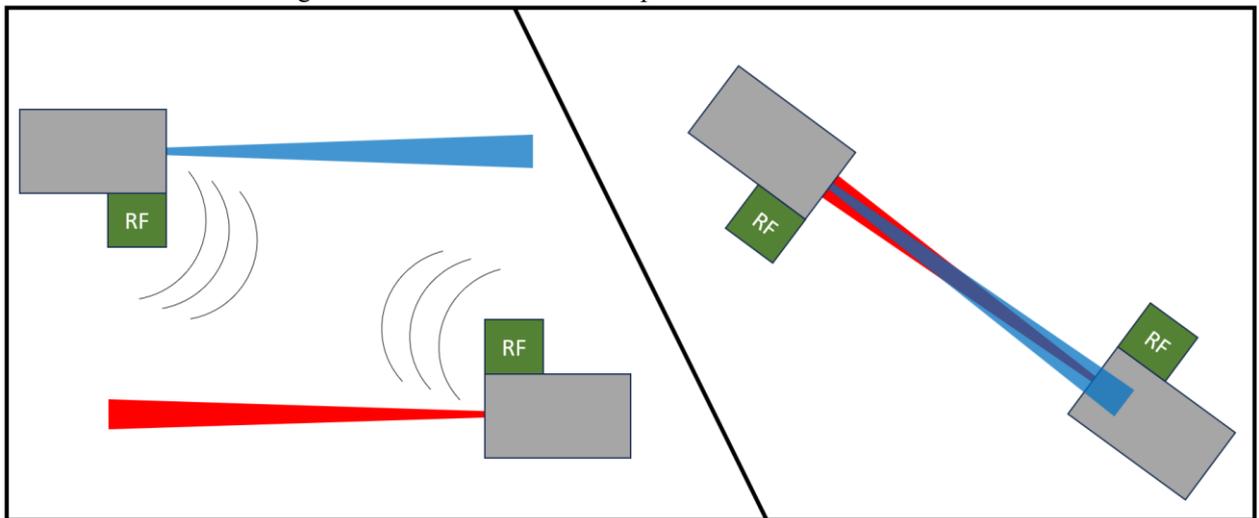
Nestas instalações não existe a necessidade de uma plataforma estabilizada de três eixos, como é o caso dos navios, pois o próprio meio pode estabilizar uma das dimensões enquanto usa o equipamento de FSO, como é o caso do drone, que tem um controle muito maior e consegue estabilizar seus eixos de liberdade (Park et al., 2022), ou está limitado em um ou mais dos seus eixos, como é o caso de um edifício ou trem, os quais somente têm que compensar as pequenas trepidações e assim manter o enlace (Al-Gailani et al, 2021).

Sendo assim, como ainda não se tem um transceptor esférico comercial, e levando em consideração a peculiaridade dos movimentos de uma embarcação, a plataforma estabilizada precisa ser mantida no modelo.

O próximo ponto a ser verificado é o “Sistema de Aquisição”, o qual tem a árdua tarefa de encontrar a posição do elemento com quem se quer estabelecer um link de comunicação. A não realização ou má execução deste processo torna impossível a tarefa de envio de sinais de um transceptor para o outro.

Entre os sistemas verificados foi identificada uma alternativa a proposta de Timus (2004), na qual se utilizaria uma antena de RF no sistema FSO (Alqurashi et al., 2022) para estabelecer um enlace inicial. Este sistema misto enviaria as informações de posição e permitiria calcular a solução de apontamento. Sendo assim, seria possível tirar proveito das características de propagação do RF, para iniciar e manter o apontamento, e das altas taxas de transmissão de dados dos sistemas FSO.

Figura 12.2 - Funcionamento do apontamento com uso de RF.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Esta solução, apesar de ser mais prática e eficiente (Kaymak et al., 2018) que o uso de um feixe de farol em uma plataforma rotativa, pode causar a exposição da posição dos transmissores de RF e impossibilitar a comunicação discreta, mesmo que estas transmissões sejam de curta duração e de baixa potência.

Posto isto, a solução do uso de um feixe de farol ainda seria a melhor opção para este tipo de comunicação, pois a grande vantagem deste SISCO é a capacidade de impossibilitar que a presença de um meio seja revelada por conta da necessidade de se comunicar.

Entretanto, mesmo sabendo da importância deste tipo de sistema, não foi apresentada uma solução para gerar essas mudanças na divergência do feixe. Por conta disto agora será abordado o “Sistema de Ajuste de Apontamento”, para o qual foram procuradas diversas soluções de ajuste de foco com a intenção de incrementar o modelo.

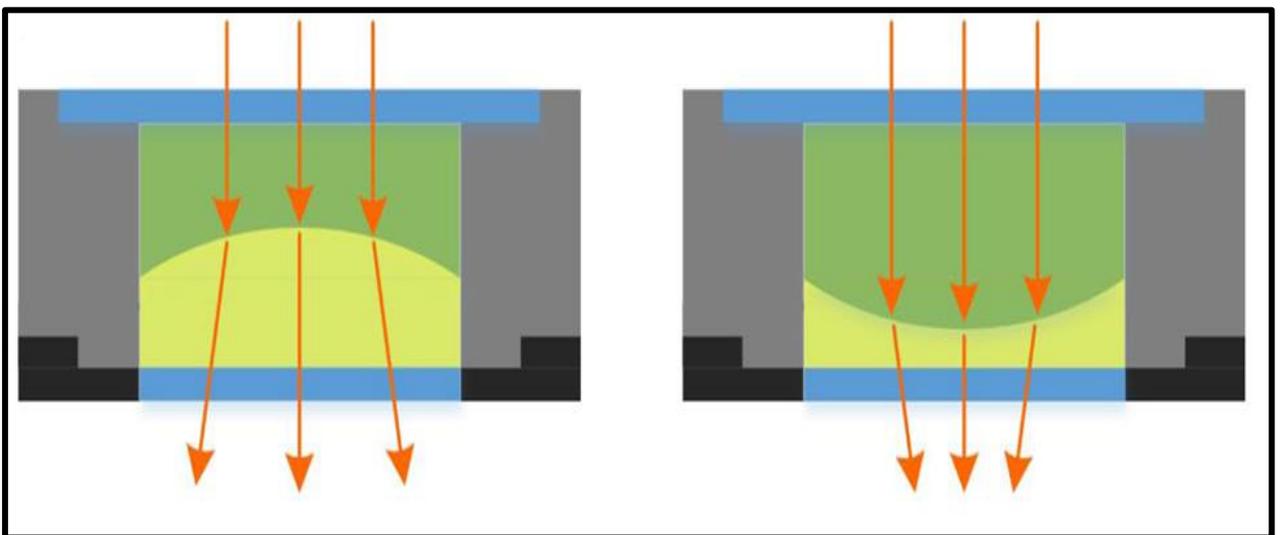
A maioria delas tinha como base o uso de lentes móveis de vários tipos, ou mesmo o uso de lasers instalados em bases que pudessem ajustar a distância entre estes e as lentes e assim permitir diversas configurações de abertura do feixe (Zhang et al, 2023).

Porém, estas partes móveis poderiam gerar vibrações e dificultar o problema de solução de apontamento. Logo, uma maneira de eliminar o problema da vibração e atingir o objetivo de controlar com eficiência o ajuste do feixe seria utilizar lentes de zoom com tecnologia de Lentes Líquidas (LL) para produzir e ajustar os feixes de farol e de comunicação.

Este método usa o foco ajustável de uma LL para alterar o ângulo de divergência do feixe. Atualmente, existem três tipos, são elas a Lente Líquida Eletrostática (LLE), a Lente Líquida de Cristal Líquido (LLCL) e as Lente Líquida Hidráulica acionada Mecanicamente (LLHM) (Zhang et al, 2023).

A LLE contém dois líquidos de densidade semelhante e insolúveis entre si. A superfície de contato líquido-líquido forma uma superfície refrativa e o raio de curvatura da superfície pode ser alterado por aplicação de corrente elétrica, permitindo a modificação do foco (Zhang et al, 2023).

Figura 12.3 - Lente líquida eletrostática.



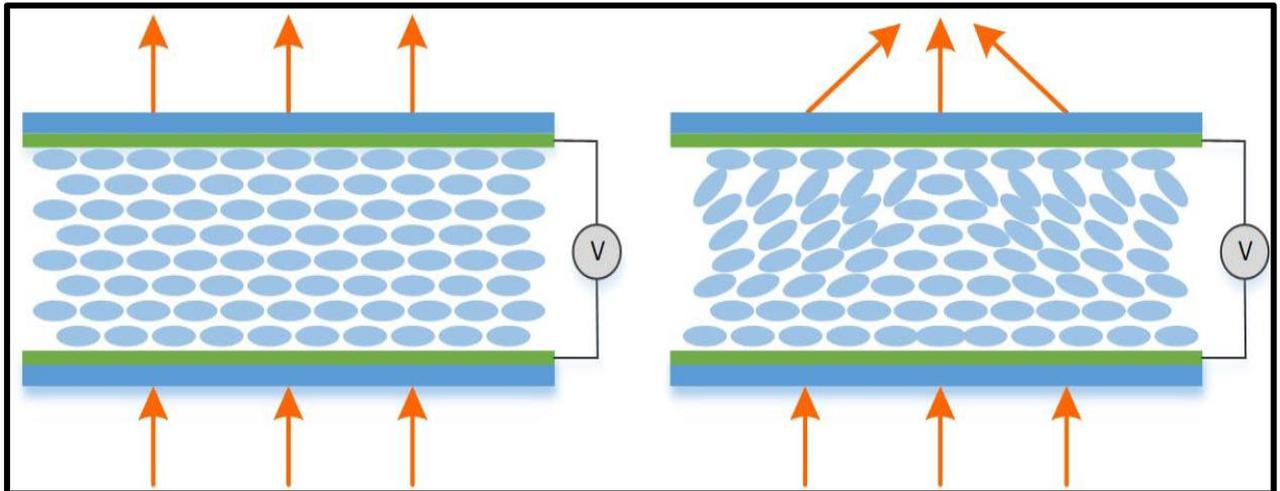
Fonte: Adaptado de Zhang et al, 2023.

A vantagem de usá-la para alterar o ângulo de divergência do feixe é que o princípio é simples, o zoom é grande e não existem elementos de deslocamento mecânicos, o que gera um tempo de resposta extremamente baixo. Além disso, pode formar lentes espontaneamente com qualidade de superfície muito alta (Zhang et al, 2023).

No entanto, também enfrenta dificuldade em aumentar a abertura (Zhang et al, 2023) e, devido à natureza líquida da interface, é sensível a vibrações mecânicas (Yu et al., 2012).

Outro tipo é a LLCL, na qual se aplica uma voltagem a um eletrodo especialmente configurado, o qual gera um campo elétrico de gradiente variável que altera o índice de refração e o comprimento focal da lente (Zhang et al, 2023).

Figura 12.4 - Lente líquida de material de cristal líquido.

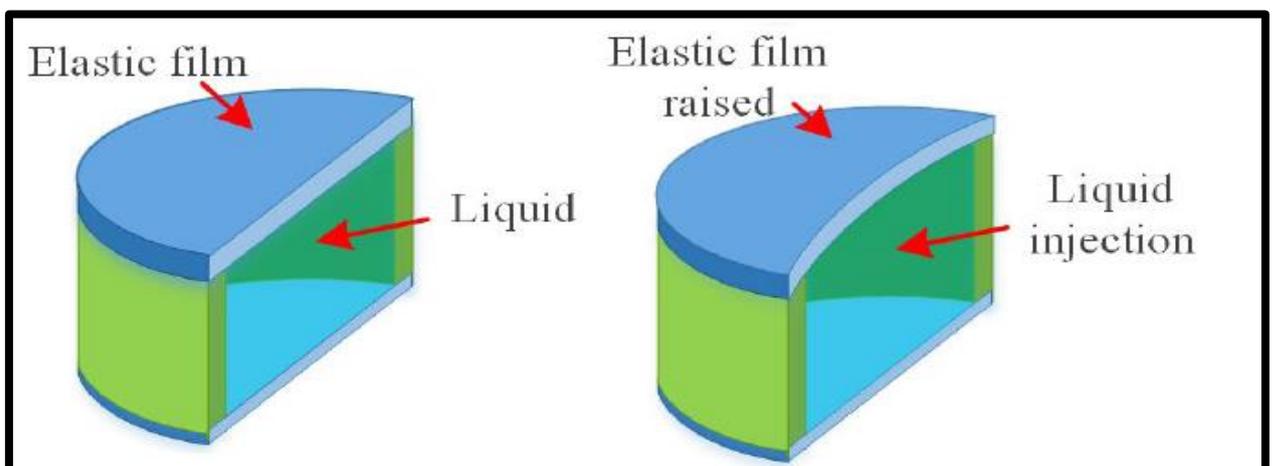


Fonte: Adaptado de Zhang et al, 2023.

Uma vantagem dela é que a camada de cristal líquido pode ser muito fina, na ordem de micrometros, a tensão de acionamento necessária é baixa (Zhang et al, 2023) e o consumo de energia é reduzido (Lin; Wang; Reshetnyak et al., 2018).

E o terceiro tipo é a LLHM, essa técnica envolve confinar o líquido dentro de uma cavidade fechada usando um filme elástico e, ao aplicar pressão externa, se altera o raio de curvatura do filme e o comprimento focal da lente líquida pode ser modificado (Zhang et al, 2023).

Figura 12.5 - Lente líquida hidráulica acionada mecanicamente.



Fonte: Adaptado de Zhang et al, 2023.

Assim como as outras seu tempo de resposta é curto, porém, a superfície do filme elástico afeta a transmitância da luz e, por ser rugosa, pode gerar uma deformação na transmissão (Zhang et al, 2023), o que reduziria a qualidade do sinal. Além disto, a superfície externa do filme elástico é propensa a absorver poeira e outras pequenas partículas, o que também pode diminuir a eficiência da comunicação (Zhang et al, 2023).

De modo geral, o uso de uma lente líquida para alterar o ângulo de divergência do feixe apresenta várias vantagens, incluindo um tempo de resposta curto, da ordem de milissegundos, e uma ampla faixa de variação para o ângulo de divergência, com alguns sistemas atingindo um mínimo de $0,02^\circ$ e máximo 13° (Zhang et al, 2023).

Estes valores de ângulo de divergência do feixe atenderiam a necessidade do sistema FSO de gerar feixes de farol e, de forma rápida, mudar para o feixe de comunicação.

Outra vantagem é que seria possível concentrar o feixe em divergências muito pequenas para aprimorar a qualidade de uma recepção em comunicações a longas distâncias ou mesmo realizar a abertura do feixe, conforme as plataformas se aproximassem, de forma a não saturar o receptor.

Além disso, permitiria dirimir os efeitos de atenuação do espaço livre e de espalhamento, causado por turbulência ou partículas suspensas na atmosfera, algo que possibilitaria uma menor taxa de BER e permitiria um aumento na taxa de dados.

Levando em consideração as vantagens e desvantagens de cada tipo de lente, a melhor opção seria a LLCL, por poder operar em plataformas móveis, não ter partes mecânicas que poderiam gerar distorções e por seu baixo tempo de resposta.

Em contraponto, essa capacidade de reduzir o ângulo de divergência do sinal pode concentrar demais a transmissão e, por vezes, ocasionar na saturação do receptor, o que pode causar danos em componentes. Como o transmissor não tem meios para detectar isso, se faz necessário a instalação de um obturador na recepção do sinal.

E por conta das vantagens apresentadas acima também foi escolhido um com tecnologia de cristal líquido a qual pode fechar o obturador em um tempo até 10 vezes mais rápido (Thorlabs, 2017) que obturadores mecânicos (Thorlabs, 2013).

O próximo subsistema a ser analisado será o “Sistema de correção de turbulência”. No projeto original seria utilizado um FSM para realizar os ajustes na direção de transmissão, para corrigir pequenos desvios de apontamento oriundos de turbulência ou mesmo de pequenos movimentos dos navios.

Para corrigir o ângulo de transmissão e manter o sinal no ponto focal do receptor os FSM ainda são uma boa solução. Isto pode ser afirmado porque este tipo de componente ainda

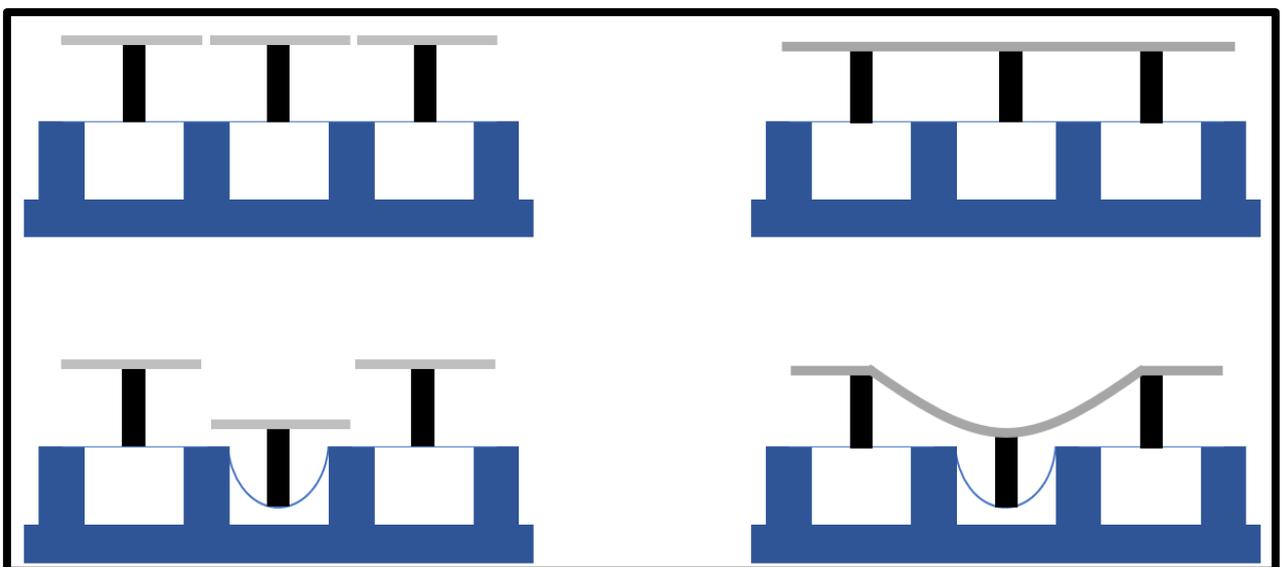
é utilizado por sistemas comerciais modernos (Kaymak et al., 2018) e por isso será mantido na proposta de melhora.

O trabalho de Timus (2004) abordou como iniciar o enlace e os itens necessários na transmissão que possibilitassem a manutenção do link, porém, não propôs nenhuma melhoria no que aprimorasse o sinal recebido. Sendo assim, foi deixada uma lacuna, a qual vai ser corrigida com o uso de Ótica Adaptativa.

Está é uma técnica instrumental usada corrigir perturbações nas frentes de onda de forma dinâmica (Max, 2012). Os instrumentos necessários são basicamente um sensor de Frente de Onda, o qual detectará o formato da frente de onda que chega ao receptor, um *Deformable Mirror* (DM), em português Espelho Deformável, e um subsistema de controle (GMT Brasil, 2023).

Um DM é um equipamento composto por atuadores micro eletromecânicos à base de silício e de pequenos espelhos integrados, sendo estes pequenos pedaços de espelho polido ou uma manta reflexiva (Max, 2012).

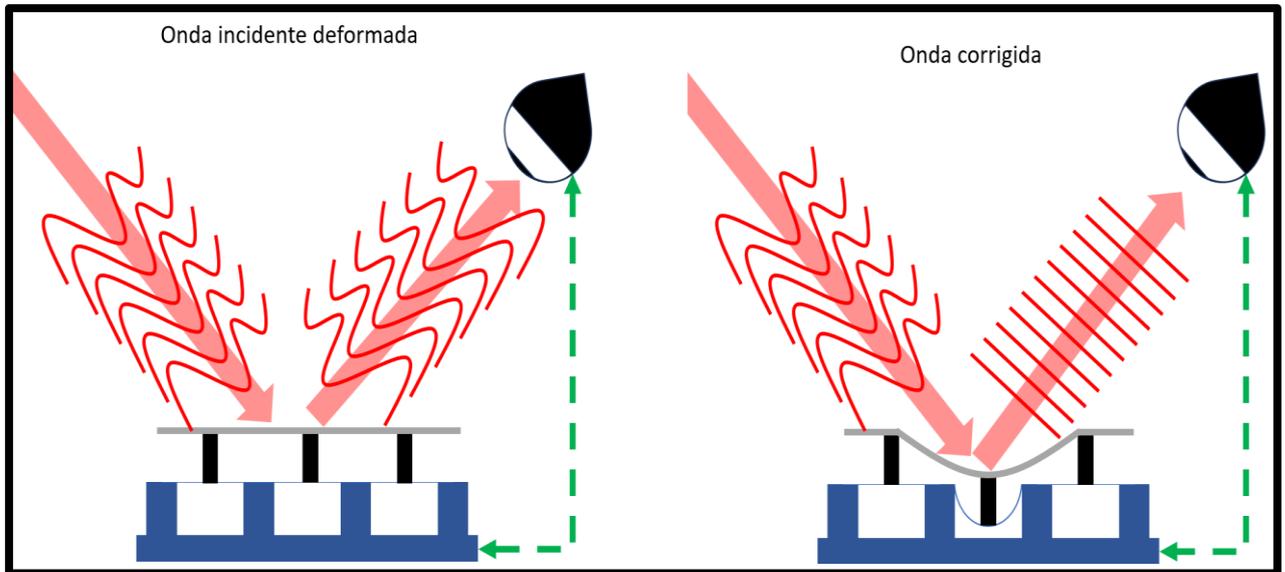
Figura 12.6 - Representação de um DM e seus tipos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Estes pequenos atuadores conseguem ajustar suas alturas e mudar o posicionamento destes espelhos ou deformar a manta. Com isso ele modifica a frente de onda de entrada, de acordo com o que seu sensor registra, como aberrações ópticas residuais. Estes ajustes devem acontecer centenas de vezes em um segundo para compensar as mudanças que ocorrem na atmosfera (Max, 2012).

Figura 12.7 - Representação de uma frente de onda sendo corrigida por um espelho deformável.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Estes mecanismos são utilizados principalmente em grandes telescópios com o intuito de corrigir as deformações na luz proveniente de estrelas, as quais são distorcidas em seu deslocamento por centenas de quilômetros de atmosfera, possibilitando a melhora na nitidez das imagens (Max, 2012).

Estes espelhos têm um baixo tempo de resposta, e alguns modelos reagem em até $75\mu\text{s}$, como é o caso de alguns dos modelos da Thorlabs (2014) ou mesmo $20\mu\text{s}$ como o modelo 276-1.5-DM da Boston Micromachines Corporation (2020).

Considerando o índice de Strehl, o qual é usado para definir a qualidade de um sistema óptico, mostrando como um sistema óptico real se compara a um ideal (John, 2020), alguns modelos de DM podem atingir a um coeficiente médio de Strehl de 0,8 (Devaney et al., 2008).

E um valor de 0,8 Strehl é convencionalmente usado para definir um sistema óptico como “difração limitada” ou ideal (John, 2020), sendo assim, este tipo de componente poderia elevar a eficiência de todo o sistema.

Isto poderia permitir uma melhor taxa de recepção, uma menor incidência de erros e permitir uma largura de banda maior.

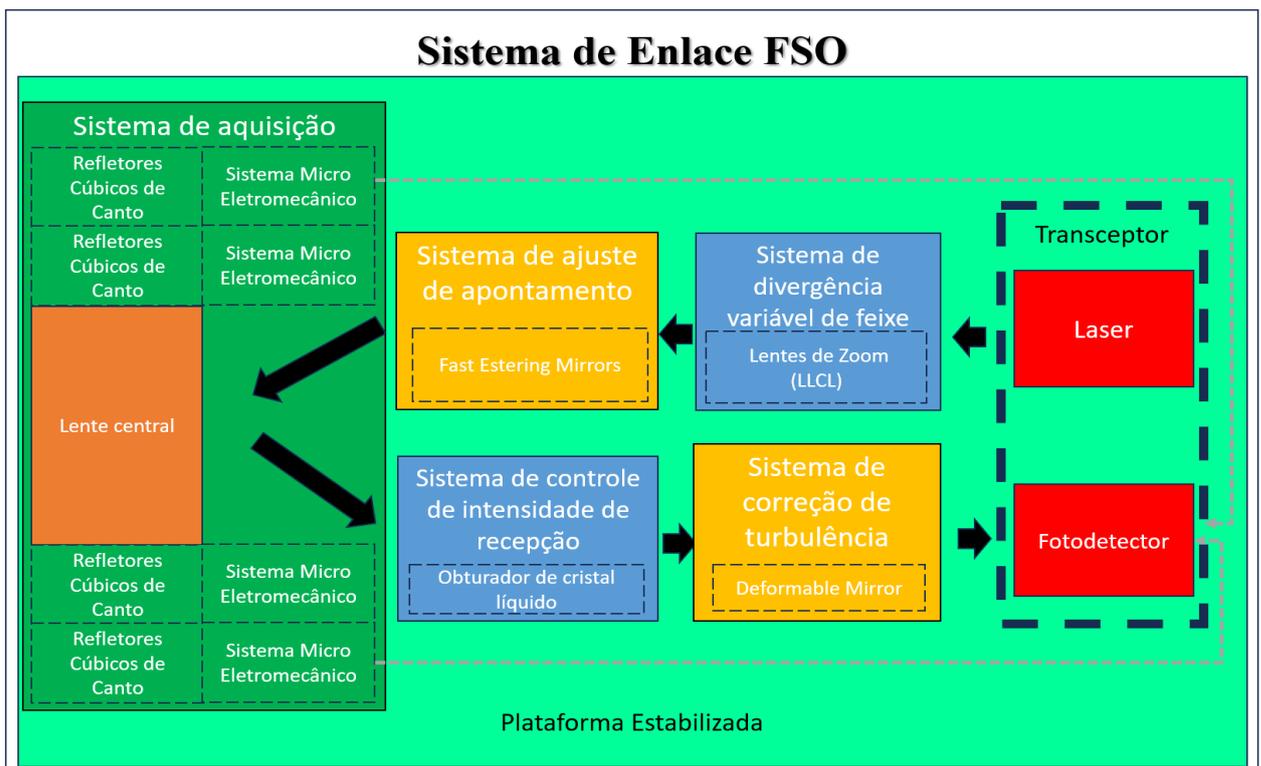
Sua capacidade de correção está sendo aproveitada inclusive em sistemas de comunicação satelital multi-spot (Skryja; Poliak; Wilfert, 2022), buscando entregar melhor eficiência na recepção.

Quanto ao laser transmissor e ao fotodetector, não há o que apresentar de mudanças, os comprimentos de onda utilizados no modelo em análise são os mesmos dos atuais SISCOM de FSO.

Com base nos dados apresentados acima e de forma a consolidar os incrementos propostos, foi delineada uma nova abstração, a qual poderá ser utilizada como base para a construção deste tipo de sistema de comunicação.

Além disso, alguns sistemas foram modificados, como o Sistema de ajuste de apontamento o qual irá armazenar o FSM, e o sistema de correção de turbulência, o qual utilizará um DM. E outros sistemas foram anexados, como o sistema de controle de intensidade de recepção, o qual funcionará através de um obturador de cristal líquido, e o sistema de feixe de divergência variável, centrado em uma lente de zoom com LLCL, conforme abaixo demonstrada:

Figura 12.8 – Diagrama de blocos do modelo de sistema FSO.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Após apresentar o modelo e explicar cada um de seus elementos, foi possível perceber que apesar de alguns elementos serem mantidos, como o uso de FSM, de comprimentos de onda de 1310 e 1550 μ m e de feixes de farol, seriam necessárias algumas melhorias.

Isso pode ser afirmado porque não se procurou corrigir a cintilação gerada por turbulência, melhorar a recepção de sinal e proteger o transceptor em caso de saturação. Além disso só se propôs o uso do caso do feixe de farol e não se tratou de como gerá-lo. Por conseguinte, foram apresentados alguns equipamentos que pudessem complementar o modelo e assim melhorar seu funcionamento.

A tabela 5.1 compila todos os desafios a serem enfrentados por um transceptor FSO e os componentes que corrigem ou atenuam as anomalias dos modelos de Timus (2004) e da nova proposta, o que facilita a percepção do aprimoramento da abstração.

Tabela 5.1 – Comparação dos dois modelos.

Desafios		Modelo de Oguzhan Timus	Modelo Proposto
Apontamento		CCR	CCR e Lentes de zoom com LLCL
Manutenção de apontamento		Plataforma estabilizada e FSM	Plataforma estabilizada e FSM
Movimentos do navio		Plataforma estabilizada e FSM	Plataforma estabilizada e FSM
Saturação do Receptor		-	Obturador de CL
Atenuação do Espaço Livre		-	Lentes de zoom com LLCL
Absorção por gases da atmosfera		Laser sintonizável (1310~1550nm)	Laser sintonizável (1310~1550nm)
Turbulência	Desvio do feixe	FSM	FSM
	Deformação da frente de onda	-	DM
Fenômenos atmosféricos		Laser sintonizável (1310~1550nm)	Laser sintonizável (1310~1550nm) e Lentes de zoom com LLCL

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após realizar todas estas análises pôde-se concluir que o modelo em pauta carecia de melhorias, não só por conta da evolução tecnológica, como também por não tratar de certas correções que poderiam comprometer o uso deste tipo de equipamento.

5.1 Considerações Finais

A FSO está ganhando espaço como uma tecnologia de banda larga alternativa, fornecendo transmissão de dados rápida, segura e confiável entre pontos fixos (EC System International, 2023a) e em comunicação satelital (Nguyen, 2015), características que motivaram o tema deste artigo acadêmico.

A segurança nas comunicações é uma prioridade nas operações militares, pois sem ela não é possível coordenar as ações ou mesmo receber atualizações de informações sobre o conflito. Entretanto, são uma lâmina de dois gumes, pois, se ocorrem de forma excessiva podem expor a posição de uma frota e facilitar o recebimento de ataques.

Como foi demonstrado, por operar com feixes direcionais de pequena divergência é muito difícil detectar e interceptar um feixe laser de IV devido a sua diretividade e as atenuações a que está sujeito.

É por isso que o link óptico, fornecido por um sistema FSO, pode se tornar um alicerce em operações navais, ao permitir comunicações de alta eficiência em diversos tipos de operação. Logo, o investimento e desenvolvimento na área pode permitir não só um avanço num ambiente militar, como também uma oportunidade comercial para um estado nação que assim desenvolver esse sistema.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

A evolução dos SISCOS busca trazer não só melhores taxas de transmissão, como também permitir inovações no mercado. Um exemplo disto é a tecnologia da rede móvel celular, em sua evolução do 4G para o 5G, que permitiu uma melhora na comunicação entre os elementos de *Internet of Things* (IOT) e vem possibilitando uma evolução, inclusive em carros inteligentes, os quais poderão operar de forma autônoma, devido a comunicação entre diversos dispositivos (Izo, 2023).

Nas tecnologias FSOs isso não é diferente, estão sendo desenvolvidas novas formas de se resolver problemas já conhecidos e conquistar uma maior eficiência para este tipo de sistema.

Um destes casos é o desenvolvimento de técnicas de Ótica Adaptativa com uso de Cristal Líquido (Restaino et al., 2003). Nestas buscam-se construir protótipos de corretores de turbulência com o uso de LLCL, os quais permitiriam um menor tempo de resposta nas correções de perturbações nas frentes de onda e melhorariam o

desempenho da tecnologia. Além disto, estes têm menor custo de produção e maior tempo de vida útil por não terem partes móveis (Restaino et al., 2003).

Alguns trabalhos como Wu et al. (2022) e Zhang et al. (2020) já apresentam propostas interessantes neste campo que poderão se tornar soluções comerciais, melhorar ainda mais o desempenho da tecnologia e desenvolver abstrações cada vez melhores.

Vale ressaltar que a FSO não é a única solução no campo das comunicações modernas, estudos no campo da física quântica tem trazido à tona novos métodos de comunicação para o futuro, como comunicações com base em entrelaçamento quântico (Cacciapuoti et al., 2020) e a comunicação quântica contrafactual direta (Cao et al., 2017), estudos que podem permitir troca de informação de forma rápida e segura em longas distâncias.

Sendo assim, é sempre importante estudar e aprimorar as tecnologias de comunicação em uso, porém, também deve ser dada importância no desenvolvimento de novas tecnologias e assim poder tirar proveito das vantagens que essas podem trazer.

REFERÊNCIAS

- AL-GAILANI, Samir Ahmed et al. A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks. **IEEE Access**, [S. l.], ano 2021, v. 9, p. 7353-7373, 29 dez. 2020. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3048049. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9310183>. Acesso em: 8 out. 2023.
- ALI, Mustafa H.; AJEL, Rehab I.; HUSSAIN, Samira Abdul-Kader. Performance analysis of beam divergence propagation through rainwater and snow pack in free space optical communication. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, [s. l.], ano 2021, v. 10, n. 3, p. 1395-1404, 3 jun. 2021. DOI 10.11591/eei.v10i3.2857. Disponível em: <https://beei.org/index.php/EEI/article/download/2857/2183>. Acesso em: 8 out. 2023.
- ALKHOLIDI, Abdulsalam Ghalib; ALTOWIJ, Khaleel Saeed. Free Space Optical Communications: Theory and Practices. In: KHATIB, Mutamed (ed.). **Contemporary Issues in Wireless Communications**. [S. l.]: IntechOpen, 2014. cap. 5, p. 1 - 254. ISBN 978-953-51-1732-2. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/47585>. Acesso em: 8 out. 2023.
- ALQURASHI, Fahad S.; TRICHILI, Abderrahmen; SAEED, Nasir; OOI, Boon S.; ALOUINI, Mohamed-Slim. Maritime Communications: A Survey on Enabling Technologies, Opportunities, and Challenges. **IEEE Xplore**, [S. l.], ano 2022, v. 10, n. 4, p. 3525 - 3547, 4 set. 2022. DOI 10.1109/JIOT.2022.3219674. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9939173>. Acesso em: 13 out. 2023.
- AZEVEDO, Julia. **Radiação infravermelha é toda a radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 700 nanômetros e 1 milímetro**. [S. l.], 1 jun. 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/radiacao-infravermelha/#tbl-em-lnsy06vo52c3oq2tqkf>. Acesso em: 16 out. 2023.
- BORWANKAR, Saumya; SHAH, Dhruv. EFFECT OF WEATHER CONDITIONS ON FSO LINK. **ArXivLabs: experimental projects with community collaborators**, [S. l.], v. 1, 17 set. 2021. Signal Processing, p. 19-22. DOI 10.48550/arXiv.2009.08317. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2009.08317?context=eess.SP>. Acesso em: 8 out. 2023.
- BOSTON MICROMACHINES CORPORATION (EUA, MA, Cambridge). Standard Deformable Mirrors. In: **Standard Deformable Mirrors**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://bostonmicromachines.com/products/deformable-mirrors/standard-deformable-mirrors/>. Acesso em: 14 out. 2023.
- CACCIAPUOTI, Angela Sara; CALEFFI, Marcello; METER, Rodney Van; HANZO, Lajos. When Entanglement Meets Classical Communications: Quantum Teleportation for the Quantum Internet. **IEEE Xplore**, [S. l.], ano 2020, v. 68, n. 6, p. 3808 - 3833, 4 mar. 2020. DOI 10.1109/TCOMM.2020.2978071. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9023997>. Acesso em: 18 out. 2023.
- CANCELIER, Mariela. **Fibra óptica no fundo do mar: como funcionam os cabos submarinos de internet**. [S. l.], 4 set. 2023. Disponível em:

<https://www.mundoconectado.com.br/artigos/cabos-submarinos-de-internet-como-funcionam/>. Acesso em: 19 out. 2023.

CAO, Yuan et al. Direct counterfactual communication via quantum Zeno effect. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S. l.], ano 2017, v. 114, n. 19, p. 4920-4924, 25 abr. 2017. DOI 10.1073/pnas.1614560114. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1614560114>. Acesso em: 13 out. 2023.

COMMSCOPE (EUA, PA, Royersford). **VHLPX2-11W/B**. [S. l.: s. n.], 2022a. Disponível em: <https://www.commscope.com/product-type/antennas/microwave-antennas-accessories/point-to-point-ptp-microwave-antennas/vhlp2-11w-b/>. Acesso em: 13 out. 2023.

COMMSCOPE (EUA, PA, Royersford). **VHLP2-32/C**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.commscope.com/product-type/antennas/microwave-antennas-accessories/point-to-point-ptp-microwave-antennas/vhlp2-32-c/>. Acesso em: 13 out. 2023.

COMMSCOPE (EUA, PA, Royersford). **VHLP2-80/B**. [S. l.: s. n.], 2022b. Disponível em: <https://www.commscope.com/product-type/antennas/microwave-antennas-accessories/point-to-point-ptp-microwave-antennas/vhlp2-32-c/>. Acesso em: 13 out. 2023.

CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS, 2013, San Jose, CA, USA. **Free-Space Optical Time-Frequency Transfer Over 2 km [...]**. [S. l.]: IEEE Xplore, 2013. 2 p. DOI 10.1364/CLEO_SI.2013.CM4N.4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6833299>. Acesso em: 13 out. 2023.

DEVANEY, Nicholas; DALIMIER, Eugenie; FARRELL, Thomas; COBURN, Derek; MACKAY, Ruth; MACKAY, David; LAURENT, Francois; DALY, Elizabeth; DAINTY, Chris. Correction of ocular and atmospheric wavefronts: A comparison of the performance of various deformable mirrors. **Optica Publish Group**, [S. l.], ano 2008, v. 47, n. 35, p. 6550-6562, 4 dez. 2008. DOI 10.1364/ao.47.006550. Disponível em: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-47-35-6550>. Acesso em: 14 out. 2023.

DIALOGANDO. **Como funciona o infravermelho?**. [S. l.], 6 jan. 2020. Disponível em: <https://dialogando.com.br/inovacao/como-funciona-o-infravermelho/>. Acesso em: 16 out. 2023.

EC SYSTEM INTERNATIONAL (República Checa, Praga, Na Výsluní). **FREE SPACE OPTICS**. In: Wireless Point-to-Point and Point-to-Multipoint solution. [S. l.], 2023a. Disponível em: <http://www.ecsystem.cz/en/products/free-space-optic-equipment>. Acesso em: 13 out. 2023.

EC SYSTEM INTERNATIONAL (República Checa, Praga, Na Výsluní). **EL-10Gex**. [S. l.: s. n.], 2023b. Disponível em: http://www.ecsystem.cz/ec_system/download/el-10gex.pdf. Acesso em: 13 out. 2023.

FIBER MALL (China, Hong Kong, San Po Kong). **DWDM e comprimentos de onda regulares em comunicação óptica**. [S. l.], 5 nov. 2023. Disponível em: <https://www.fibermall.com/pt/blog/dwdm-and-regular-wavelengths-in-optical-communication.htm>. Acesso em: 16 out. 2023.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GMT BRASIL (Brasil, SP, São Paulo). **Óptica Adaptativa**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gmt.iag.usp.br/projetos/optica-adaptativa#:~:text=%C3%93ptica%20Adaptativa%20%C3%A9%20uma%20t%C3%A9cnica,na%20observa%C3%A7%C3%A3o%20de%20objetos%20astron%C3%B4micos>. Acesso em: 14 out. 2023.

GOUVEIA, Fahim. **Projeto de um transceptor óptico para comunicação digital em espaço livre**. Orientador: Prof Dr. José Kleber da Cunha Pinto. 2017. 108 p. Tese (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São paulo, [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-04072007-133531/publico/Cap1IntroducaoaFSO.pdf>. Acesso em: 19 out. 2023.

INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, 2018, Olympic Valley, CA, USA. **Time Synchronization Over a Free-Space Optical Communication Channel [...]**. [S. l.]: IEEE Xplore, 2018. 5 p. DOI 10.1109/FCS.2018.8597493. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8597493>. Acesso em: 13 out. 2023.

IZO, Alexandre. **Carros conectados no 5G: Rede irá reduzir o trânsito e acidentes, mas há riscos e preocupações**. [S. l.], 6 abr. 2023. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/mobilidade/noticia/2023/04/carros-conectados-no-5g-rede-ira-reduzir-o-transito-e-acidentes-mas-ha-riscos-e-preocupacoes.ghtml>. Acesso em: 18 out. 2023.

JOHN. **Understanding Strehl ratio & wavefront error for optical systems**. [S. l.], 16 jun. 2020. Disponível em: <https://www.opticsforhire.com/blog/understanding-strehl-ratio-amp-wavefront-error-for-optical-systems/>. Acesso em: 17 out. 2023.

JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY (EUA, MD, Laurel). **APL Demonstrates High-Bandwidth Communications Capability at Sea**. [S. l.], 24 ago. 2017. Disponível em: <https://www.jhuapl.edu/news/news-releases/170824b-high-bandwidth-communications-capability-sea>. Acesso em: 13 out. 2023.

KAUSHAL, Hemani; KADDOUM, Georges. Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques. **ArXivLabs: experimental projects with community collaborators**, [S. l.], 16 jun. 2015. Computer Science, Information Theory, p. 1-28. DOI 10.48550/arXiv.1506.04836. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.04836>. Acesso em: 8 out. 2023.

KAYMAK, Yagiz; ROJAS-CESSA, Roberto; FENG, Jianghua; ANSARI, Nirwan; ZHOU, MengChu; ZHANG, Tairan. A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S. l.], ano 2018, v. 20, 9 fev. 2018. 2, p. 1104 - 1123. DOI 10.1109/COMST.2018.2804323. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8288586>. Acesso em: 8 out. 2023.

KHAN ACADEMY. **O espectro eletromagnético**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/9-ano/materia-e-energia-as-ondas/ondas-eletromagneticas/a/o-espectro-eletromagnetico>. Acesso em: 16 out. 2023.

KUMAR, Suresh; SHARMA, Nishant. Emerging Military Applications of Free Space Optical Communication Technology: A Detailed Review. **Journal of Physics**, [S. l.], ano 2022, v. 2161, p. 1-15, 4 set. 2022. DOI 10.1088/1742-6596/2161/1/012011. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2161/1/012011/meta>. Acesso em: 13 out. 2023.

LASER INSTITUTE OF AMERICA (EUA, FL, Orlando). **Laser Safety Information**. [S. l.], 3 fev. 2004. Disponível em: <https://www.lia.org/resources/laser-safety-information>. Acesso em: 8 out. 2023.

LIN, Yi-Hsin; WANG, Yu-Jen; RESHETNYAK, Victor Yu. Liquid crystal lenses with tunable focal length. **Liquid Crystals Reviews**, [S. l.], ano 2017, v. 5, n. 2, p. 111-143, 1 mar. 2018. DOI 10.1080/21680396.2018.1440256. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323516308_Liquid_crystal_lenses_with_tunable_focal_length. Acesso em: 19 out. 2023.

MALIK, Aditi; SINGH, Preeti. **Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges**. International Journal of Optics, [S. l.], ano 2015, v. 2015, p. 1-7, 17 nov. 2015. DOI 10.1155/2015/945483. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijo/2015/945483/>. Acesso em: 13 out. 2023.

MARINHA DO BRASIL (Brasil). Diretoria de Hidrografia e Navegação. **MANUAL DO OBSERVADOR METEOROLÓGICO**. 3. ed. Niterói, RJ, Brasil: [s. n.], 2015. 150 p. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1907/manual-observador-completo.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

MAX, Claire E. **Adaptive Optics: An Introduction**. EUA, CA, Santa Cruz: [s. n.], 2012. Disponível em: https://www.ucolick.org/~max/289/Assigned%20Readings/Max_Adaptive_Optics_Intro_v1.pdf. Acesso em: 14 out. 2023.

MOORE, Christopher I.; BURRIS, Harris R.; SUITE, Michele R.; STELL, Mena F.; VILCHECK, Michael J.; DAVIS, Mark A.; SMITH, R.; MAHON, R.; RABINOVICH, William S.; KOPLOW, Jeffrey P.; MOORE, S. W.; SCHARPF, William J.; REED, Anne E. Free-space high-speed laser communication link across the Chesapeake Bay. **SPIE Proceedings**, [S. l.], ano 2002, v. 4821, p. 474-485, 9 dez. 2002.

MUÑOZ, Clara Elizabeth Verdugo. **Fog and rain attenuation models for the design of FSO links in 5G+**. Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello. 2022. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, [S. l.], 2022.

MURPHY, Samuel William. **Monitoramento Orbital De Vulcões No Espectro Infravermelho**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho. 2013. 169 p. Tese (Doutorado em ciências na área de geologia e recursos naturais) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, [S. l.], 2013. DOI 10.47749/T/UNICAMP.2013.909742. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/909742>. Acesso em: 16 out. 2023.

NGUYEN, Tam Nguyen Thuc. **Laser Beacon Tracking for Free-space Optical Communication on Small-Satellite Platforms in Low-Earth Orbit**. Orientador: Kerri Cahoy. 2015. 94 p. Tese (Mestrado em ciências de aeronáutica e astronáutica) - MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, [S. l.], 2015.

NYKOLAK, G.; PAULSON, B.D.; TOURGEE, G.E. Architecture and operating experience for an optical wireless OC-3 network from the USS John C Stennis to a North Island pier-side facility. **IEEE Xplore - MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings**, [S. l.], ano 1999, v. 1, p. 682 - 686, 31 ago. 1999. DOI 10.1109/MILCOM.1999.822770. Disponível em: https://web.archive.org/web/20060324231623id_/http://www.argreenhouse.com/society/TacCom/papers99/23_1.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

PARK, Siwoong et al. Tracking Efficiency Improvement According to Incident Beam Size in QPD-BasedPAT System for Common Path-Based Full-Duplex FSO Terminals. **Sensors**, [S. l.], ano 22, v. 22, n. 20, p. 7770-7773, 22 ago. 2022. DOI 10.3390/s22207770. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/20/7770>. Acesso em: 8 out. 2023.

PEREIRA, Dimitri. **Netflix HD e 4K: Qual a velocidade de internet adequada para assistir filmes?**. [S. l.], 12 jan. 2023. Disponível em: <https://canaltech.com.br/entretenimento/netflix-hd-e-4k-saiba-qual-velocidade-de-internet-adequada-para-assistir-filmes/>. Acesso em: 17 out. 2023.

PHYSIK INSTRUMENTE (EUA, MA, Auburn). **Understanding Fast Laser Beam Steering Mirrors for Deep Space**. [S. l.], 26 jul. 2021. Disponível em: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5781>. Acesso em: 13 out. 2023.

PHYSIK INSTRUMENTE GMBH & CO. KG (Alemanha). **V-931 High Dynamics PIMag® Voice Coil Tip/Tilt Platform: For Fast Steering Mirrors**. [S. l.: s. n.], 2021. 3 p. Disponível em: <https://www.opticsforhire.com/blog/understanding-strehl-ratio-amp-wavefront-error-for-optical-systems/>. Acesso em: 17 out. 2023.

RABINOVICH, W. S.; MAHON, R.; BURRIS, H. R.; GILBREATH, G. C.; GOETZ, P. G.; MOORE, C. I.; STELL, M. F.; VILCHECK, M. J.; WITKOWSKY, J. L.; SWINGEN, L. Free-Space Optical Communications Link at 1550-nm using Multiple-Quantum-Well Modulating Retroreflectors in a Marine Environment. **Defense Technical Information Center**, [S. l.], ano 2005, p. 1-13, 1 maio 2005. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA462152>. Acesso em: 18 out. 2023.

RESTAINO, Sergio R.; PAYNE, Don M.; BAKER, Jeff T.; ANDREWS, Jonathan R.; TEARE, Scott W.; GILBREATH, G. Charmaine; DAYTON, Dave; GONGLEWSKI, John. Liquid Crystal Technology for Adaptive Optics: Un update. **DEFENSE TECHNICAL INFORMATION CENTER**, [S. l.], p. 1-7, 1 jan. 2003. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA474938.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

RODRIGUES, Auro de Jesus. **Metodologia científica: completo e essencial para a vida universitária**. [s.l.]: Avercamp, 2006.

SHAINA,; GUPTA, Amit. Comparative Analysis of Free Space Optical Communication System for Various Optical Transmission Windows under Adverse Weather Conditions.

Procedia Computer Science, [s. l.], ano 2016, v. 89, p. 99-106, 19 ago. 2016. DOI 10.1016/j.procs.2016.06.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916310791>. Acesso em: 8 out. 2023.

SHORT, Nicholas M. **Remote Sensing Tutorial**. [S. l.: s. n.], 2002. 152 p. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA420460.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

SIDHPURWALA, Huzaifa. **Uma breve história da criptografia**. [S. l.], 12 jan. 2023. Disponível em: <https://www.redhat.com/pt-br/blog/brief-history-cryptography>. Acesso em: 17 out. 2023.

SKRYJA , Petr; POLIAK, Juraj; WILFERT , Otakar. Multi-Spot Tracking System for Free-Space Optical Communication. **Radioengineering**, [S. l.], ano 2022, v. 31, n. 2, p. 167-175, 22 mar. 2022. DOI 10.13164/re.2022-2. Disponível em: https://www.radioeng.cz/fulltexts/2022/22_02_0167_0175.pdf. Acesso em: 8 out. 2023.

STELL, M. F. *et al.* Passive optical monitor for atmospheric turbulence and windspeed. **Defense Technical Information Center**, [S. l.], p. 1-11, 1 jan. 2004. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA465238.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

SUGUMARAN, Dr. S.; GEETANJALI, Somepalli; SANDEEP, Sampathi Sandeep; VINEELA, Vukoti; VAMSI, Sangula Naga Surya Sai; KUMAR, Raavi Manoj. FSO (Free Space Optics) Communication Under Different Weather Conditions and Wavelengths. **International Journal of Engineering Research & Technology**, [S. l.], v. 10, 3 out. 2022. 13, p. 19-22. DOI 10.17577/IJERTCONV10IS13005. Disponível em: <https://www.ijert.org/fso-free-space-optics-communication-under-different-weather-conditions-and-wavelengths>. Acesso em: 8 out. 2023.

SUITE, Michele R.; BURRIS, Harris R.; MOORE, Christopher I.; VILCHECK, Michael J.; MAHON, Rita; JACKSON, Carmen; STELL, Mena F.; DAVIS, Mark A.; RABINOVICH, William S.; SCHARPF, William J.; REED, Anne E.; GILBREATH, Gcharmaine. Fast steering mirror implementation for reduction of focal-spot wander in a long-distance free-space optical communication link. **Proceedings of Society of Photo-optical Instrumentation Engineers - The International Society for Optical Engineering**, [S. l.], p. 1-9, 1 jan. 2004. DOI 10.1117/12.507701. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241485035_Fast_steering_mirror_implementation_for_reduction_of_focal-spot_wander_in_a_long-distance_free-space_optical_communication_link. Acesso em: 17 out. 2023.
TANAKA, Hugo Shigueo. Infravermelho. **Todo Estudo**. 2021. Disponível em: <https://www.todoestudo.com.br/fisica/infravermelho>. Acesso em: 16 de October de 2023.

THORLABS (EUA, NJ, Newton). **Espelhos Deformáveis**. [S. l.], 22 dez. 2014. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3258&pn=DM140A-35-UM01. Acesso em: 17 out. 2023.

THORLABS (EUA, NJ, Newton). **Liquid Crystal Optical Beam Shutters / Variable Attenuators**. [S. l.], 20 nov. 2017. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8166. Acesso em: 18 out. 2023.

THORLABS (EUA, NJ, Newton). **Obturador Diafragma com Controlador Ø1"**. [S. l.], 19 jul. 2013. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6619#7096. Acesso em: 18 out. 2023.

TIMUS, Oguzhan. **Free Space Optic Communication For Navy Surface Ship Platforms**. Orientador: Bert Lundy. 2004. 91 p. Tese (Mestrado em ciências de aeronáutica e astronáutica) - NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, [S. l.], 2004. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA422340>. Acesso em: 13 out. 2023.

TRINDADE, Dorival. **Projeto de Porto: (5)**. [S. l.], 6 maio 2019. Disponível em: <https://portogente.com.br/portopedia/106637-projeto-de-porto-5>. Acesso em: 8 out. 2023.

TUMARKIN, Paul. Novel Cube-Corner Retro-Reflector Increases Accuracy in Long Distance Measuring. In: TUMARKIN, Paul. **Novel Cube-Corner Retro-Reflector Increases Accuracy in Long Distance Measuring**. [S. l.]: Tech Blog, 20 jan. 2017. Disponível em: <https://techlaunch.arizona.edu/news/2017/01/tech-blog-novel-cube-corner-retro-reflector-increases-accuracy-long-distance-measuring>. Acesso em: 8 out. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (Brasil, RS, Porto Alegre). **O Espectro eletromagnético**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>. Acesso em: 13 out. 2023.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 2ª. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

VIASAT (EUA, CA, Carlsbad). **Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges**. [S. l.], 15 jun. 2023a. Disponível em: <https://news.viasat.com/blog/corporate/viasat-and-durham-university-collaborate-to-advance-free-space-optical-communication-networks>. Acesso em: 13 out. 2023.

VIASAT (EUA, CA, Carlsbad). **Viasat Debuts Mercury Expeditionary Free Space Optical Communications Terminal**. [S. l.], 6 abr. 2023b. Disponível em: (<https://news.viasat.com/newsroom/viasat-debuts-mercury-expeditionary-free-space-optical-communications-terminal>). Acesso em: 13 out. 2023.

VILCHECK, M. J.; BURRIS, H. R.; MOORE, C. I.; STELL, M. F.; SUITE, M. R.; DAVIS, M. A.; MAHON, R.; OH, E.; SCHARPF, W. J.; RABINOVICH, W. S.; REED, A. E. Progress in High-Speed Communication at the NRL Chesapeake Bay Lasercomm Testbed. **Defense Technical Information Center**, [s. l.], 1 jan. 2004. DOI ADA464984. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA464984>. Acesso em: 8 out. 2023.

WU, Jiali; KE, Xizheng; YANG, Yaqi; LIANG, Jingyuan; LIU, Mingyu. Correction of Distorted Wavefront Using Dual Liquid Crystal Spatial Light Modulators. **Photonics**, [S. l.], ano 2022, v. 9, n. 6, p. 426-437, 17 jun. 2022. DOI 10.3390/photonics9060426. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-6732/9/6/426>. Acesso em: 18 out. 2023.

YU, Hongbin; GUO, Bin; TSU-HUI, Angel Lin; LIN, Julius Tsai Ming; YEE, Tack Boon. Characterization of the dynamic mechanical stability of liquid-filled lenses. **Optica Publish**

Group, [S. l.], ano 2012, v. 20, n. 21, p. 23720-23727, 1 out. 2012. DOI 10.1364/OE.20.023720. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-20-21-23720&id=242684>. Acesso em: 19 out. 2023.

ZHANG, G.; WU, J.; LI, Y.; WANG, X.; YU, X.; GAO, S.; MA, L. A Review of Variable-Beam Divergence Angle FSO Communication Systems. **Photonics**, [S. l.], ano 23, v. 10, n. 7, p. 756-769, 30 jun. 2023. DOI 10.3390/photonics10070756. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/7/756>. Acesso em: 8 out. 2023.