

MARINHA DO BRASIL  
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
GUERRA ELETRÔNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EMPREGO DA FOTÔNICA EM GUERRA ELETRÔNICA PARA AS PRÓXIMAS  
DÉCADAS: a fibra óptica e suas aplicações



1º Ten. GILBERTO BARREIRO OLIVEIRA CAVALCANTI

Rio de Janeiro  
2018

1° Ten. GILBERTO BARREIRO OLIVEIRA CAVALCANTI

EMPREGO DA FOTÔNICA EM GUERRA ELETRÔNICA PARA AS PRÓXIMAS  
DÉCADAS: a fibra óptica e suas aplicações

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Orientador:

Capitão de Corveta ROBSON RIBEIRO CARREIRA, MSc.

CIAW  
Rio de Janeiro  
2018



## FOLHA DE APROVAÇÃO

1º Ten. GILBERTO BARREIRO OLIVEIRA CAVALCANTI

EMPREGO DA FOTÔNICA EM GUERRA ELETRÔNICA PARA AS PRÓXIMAS  
DÉCADAS: a fibra óptica e suas aplicações

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Aprovada em 18/06/2018.

Banca Examinadora:

Gian Karlo Huback Macedo de Almeida, MSc \_\_\_\_\_

Robson Ribeiro Carreira, MSc \_\_\_\_\_

Beatriz Alencar Ribeiro, Msc \_\_\_\_\_

*A você Jessica, pelo amor e dedicação comigo.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, pela vida e por todas as e oportunidades de aprendizagem, que contribuem para o meu aprimoramento.

Ao Comando da Marinha, pela oportunidade de ter ampliado meus conhecimentos nesta missão recentemente criada.

Ao Capitão de Corveta Robson o meu agradecimento pela orientação e cuidado no desenvolvimento deste trabalho.

A minha esposa Jessica, pelo apoio e compreensão durante os momentos difíceis enfrentados, sendo, assim, meu porto seguro.

Aos colegas do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica, pelo apoio mútuo e pela agradável convivência dos últimos meses.

A todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

*“Rezo a Deus não pedindo cargas mais leves, e sim ombros mais fortes. E tenho repetido que no depender de mim, me recuso a ser infeliz. As coisas vão dar certo.”*

*Caio Fernando Abreu*

## EMPREGO DA FOTÔNICA EM GUERRA ELETRÔNICA PARA AS PRÓXIMAS DÉCADAS: a fibra óptica e suas aplicações

### Resumo

Este trabalho está organizado com o objetivo de apresentar um estudo teórico do enlace de sinais por fibra óptica. Este enlace apresenta uma arquitetura utilizando moduladores eletro-ópticos do tipo Mach-Zehnder. Devido ao grande número de aplicações dos enlaces a fibra óptica, os mesmos podem ser aplicados tanto em lugares de pequeno tamanho como navios e aeronaves quanto a sistemas de longo comprimento com a transmissão de sinais às antenas remotamente localizadas em relação à estação geradora do sinal. Realizou-se uma análise de importantes parâmetros de desempenho do enlace, bem como de alguns efeitos que o afetam. Esta análise se pautou às características individuais dos diversos componentes que integram o sistema. Discutiram-se os parâmetros de desempenho do enlace com modulação de intensidade e detecção direta. Respeitaram-se as características individuais dos componentes constituintes do enlace e as condições de operação do sistema, para enfim obter as melhores opções para os projetistas de sistemas a fim de obter os melhores resultados com as configurações.

**Palavras-chave:** fibra óptica, modulação externa, detecção

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação Fibra Óptica .....	10
Figura 1.2 – Enlace Genérico à Fibra Óptica .....	11
Figura 1.3 – Enlace com Modulação de Intensidade e Detecção Direta .....	12
Figura 4.1 – Dispersão Cromática .....	22
Figura 5.1 – Navio com Cabeamento à Fibra óptica .....	33

**LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

MB	Marinha do Brasil
GE	Guerra Eletrônica
MIDD	Modulação de Intensidade e Modulação Direta
FFAA	Forças Armadas
RF	Rádio Frequência
MZM	Moduladores de Mach-Zehnder
dB	Decibel
M	Metro
GHz	Gigahertz
IMOD	Ministério da Defesa Israelense
DoD	Departamento de Defesa dos EUA
CGEM	Centro de Guerra Eletrônica da Marinha
Hz	Hertz
MHz	megahertz
KM	Quilômetro

## SUMÁRIO

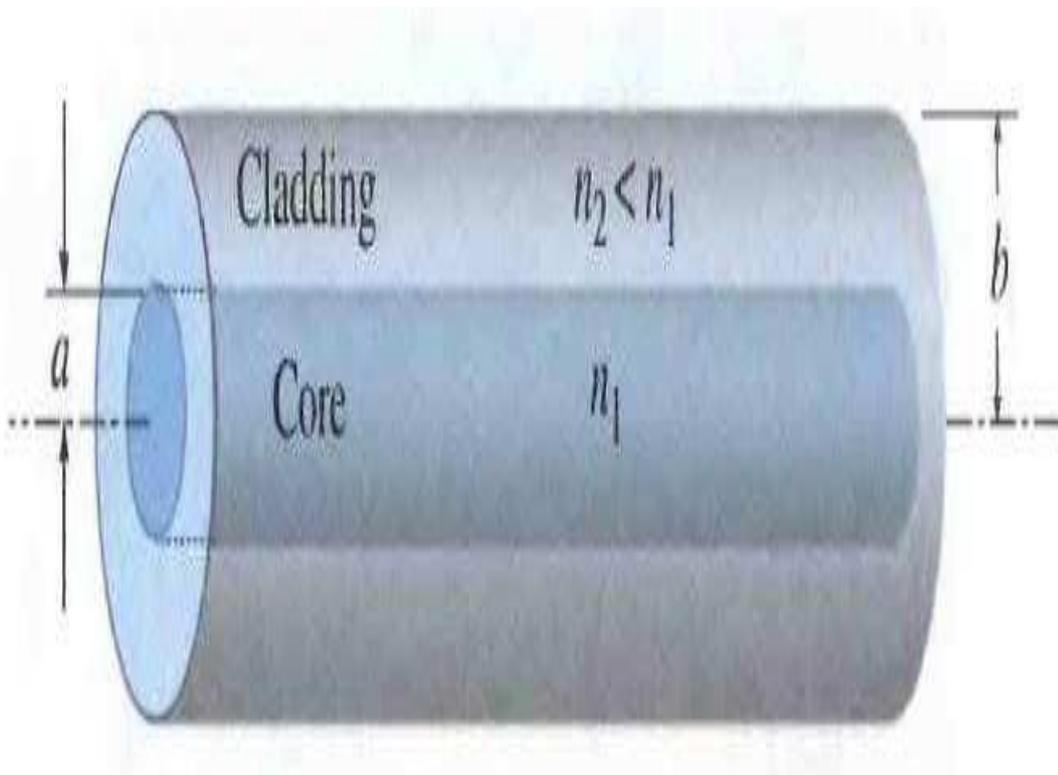
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Apresentação do Problema .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Justificativa e Relevância .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Classificação da Pesquisa.....</b>	<b>19</b>
3.1.1 Classificação Quanto aos Fins.....	19
3.1.2 Classificação Quanto aos Meios.....	20
<b>3.2 Limitações do Método .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Coleta e Tratamento dos Dados .....</b>	<b>20</b>
<b>4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Dispersão Cromática .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Enlaces Analógicos a Fibra Óptica .....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 Parâmetros de Ajuste do Enlace .....</b>	<b>26</b>
<b>4.4 Enlace com Modulação de Intensidade e Detecção Direta .....</b>	<b>27</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1 Considerações Finais .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 Sugestões para futuros trabalhos .....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A fibra óptica (do tipo SMF-28) é que foi objeto deste trabalho é composta à base de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$  popularmente chamado sílica) e é um guia de onda dielétrico de geometria circular. Por possuir propriedades de baixa atenuação, grande largura de banda, flexibilidade e imunidade eletromagnética em paralelo com outros cabos, a fibra óptica tem sido o meio mais significativo para a transmissão de dados em grandes distâncias. No entanto, alguns fenômenos podem deteriorar o sinal de maneira que fica muito difícil desfrutar de suas vantagens.

As não linearidades da fibra são relevantes em comunicações ópticas, tanto devido às propriedades almejadas quanto àquelas que se pretende evitar. As mesmas necessitam ser levadas em consideração em todas as fases de projetos de sistemas com altas taxas de dados e grande alcance que compreende grandes potências ópticas e nos quais sinais com variados comprimentos de ondas são irradiados. (SALEH; TEICH, 2007).

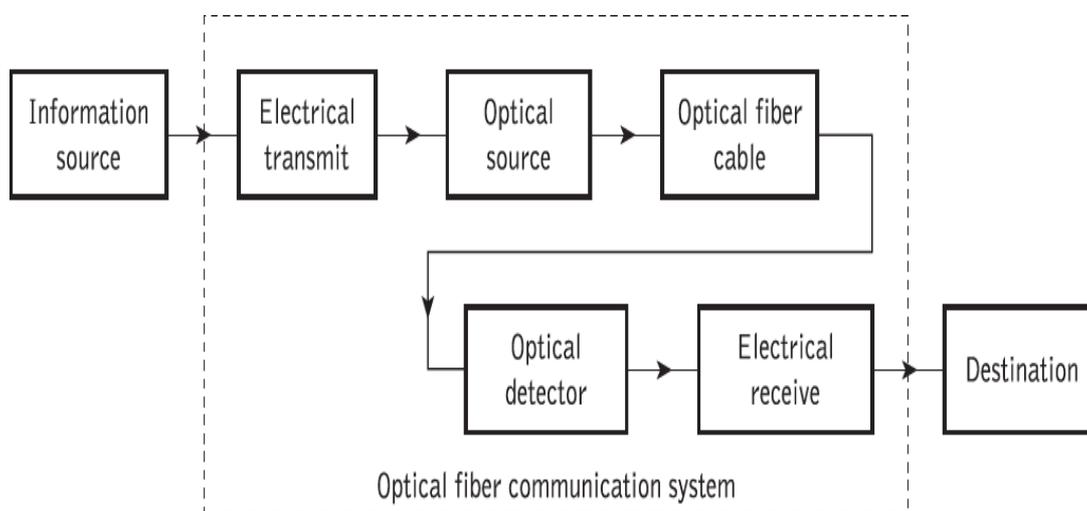
Figura 1.1 – Representação Fibra Óptica



Fonte:SALEH; TEICH (2007)

A figura acima representa a fibra óptica que é composta de um núcleo e uma casca. Para que ocorra o confinamento do feixe e consequente guiamento, o índice de refração do núcleo deve ser maior que o índice de refração da casca, como exposto acima.

Figura 1.2 – Enlace Genérico à Fibra Óptica



Fonte: SENIOR (2009)

A figura acima representa um enlace genérico aonde a informação é levada a faixa óptica do espectro eletromagnético para depois ser guiada por meio de fibra óptica e assim ser levada a um fotodetector para chegar a seu destino.

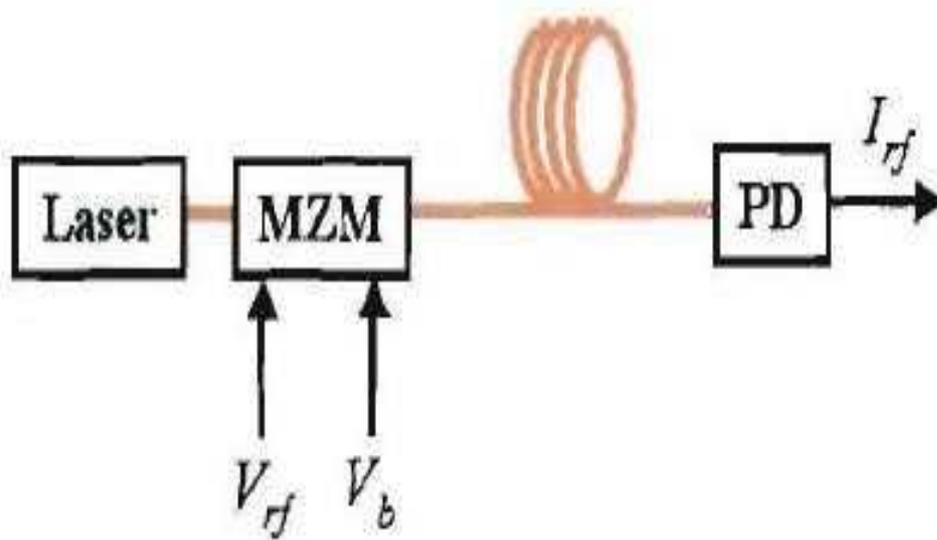
Além disso, uma abordagem matemática leva a conclusão de uma análise bastante perspicaz do enlace para qualquer formato de modulação. O grande diferencial do modelo é ilustrada pela dependência do comprimento do trecho de fibra óptica (atenuação geralmente na ordem de 0,2 decibel (dB) / quilômetro (KM)) em comparação à radiofrequência (atenuação geralmente na casa de 0.15dB/metro (M)). (GONÇALVES, 2014).

Resultados de simulações para um enlace que compreende componentes optoeletrônicas com potencial para aplicação prática em campo de guerra eletrônica (em frequências 0,6 a 20 gigahertz (GHz)). Todavia, um tratamento matemático não será o foco deste trabalho. (SENIOR; 2009).

## 1.1 Apresentação do Problema

De maneira simplificada este trabalho possui a função de verificar os aspectos positivos para a Marinha do Brasil (MB) por meio dos sistemas de Guerra Eletrônica (GE) através do emprego da fotônica, em especial a utilização da fibra óptica, para através do estudo de simples modelos, cheguem-se a aplicações nas mais variadas áreas.

Figura 1.3 – Enlace com Modulação de Intensidade e Detecção Direta



Fonte: URICK; SWINGEN; ROGGE; CAMPILLO; BUCHOLTZ; DEXTER (2005)

A figura acima representa o enlace com modulação de intensidade e detecção direta (MIDD) e por ser o mais encontrado na literatura, pois apresenta um grau de complexidade menor e uma diversidade de aplicações. Esse enlace é composto por um laser, modulador eletro-óptico do tipo Mach-Zehnder que possui a característica de ser um modulador externo de intensidade, um trecho de fibra óptica e um fotodetector.

## 1.2 Justificativa e Relevância

Tratar da modernização dos sistemas de defesa das Forças Armadas (FFAA) em especial no que tange a atividade militar naval.

No âmbito da MB, as atividades de GE dispõem de um vasto espectro de frequências: na área de GE de comunicações, contemplam as faixas de frequências HF (3 MHz a 30 MHz), VHF (30 MHz a 300 MHz) e UHF (300MHz a 3 GHz), ao passo que na área GE pertinente aos sistemas radar, englobam a faixa de 0,5 a 20 GHz. Utilizam sistemas embarcados em veículos terrestres, marítimos e aéreos.

De acordo com a faixa de frequências empregue, os mesmos sistemas estabelecem quesitos de funcionamento para os enlaces encarregados pela irradiação dos sinais de RF, em especial, entre as componentes de recepção, processamento e transmissão.

Em sistemas a bordo de navios, as antenas estão instaladas longe das estações que alojam as unidades de troca de informações com o usuário, onde os sistemas são manuseados

e monitorados. Isto faz com que diversas vezes que os componentes de transmissão, recepção e processamento do sinal sejam situados em locais adjacentes às antenas, por vezes de difícil acesso, levando em consideração o fato de as distâncias impactarem uma grande restrição aos enlaces a guias de onda e cabos coaxiais.

Este fato deve-se a grande atenuação do sinal que apresentam. Complementarmente, o grande número de funcionalidades e o grande volume de dados trafegados em meios navais e aeronavais causam a disposição de numerosas fontes de sinais, oriundos de diversas antenas, para diversos equipamentos em estações de controle, intencionando assim um grande número de guias de onda e cabos que necessitam de ser distribuídos pelo meio.

Nestas circunstâncias, aspectos como limitação de espaço físico e interferência eletromagnética tornam-se fatores primordiais e necessitam ser adequadamente levados em consideração. O uso de enlaces ópticos analógicos na irradiação desses sinais possui uma grande capacidade de utilização, não apenas pelas baixas perdas ou pela imunidade a interferências eletromagnéticas, como também pela habilidade de acarretar diversos sinais em uma mesma fibra óptica. (GONÇALVES; CARREIRA; SANTOS; PEREIRA; COUTINHO; OLIVEIRA, 2014).

As inovações tecnológicas advindas das recentes descobertas na área de microondas em fotônica, tendo destaque a fibra óptica, visam prover meio seguro e soberano às atividades de GE e serão primordiais para aumentar a eficiência dos sistemas de defesa do país.

## **1.3 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo o estudo sistêmico, em proveito da GE, do tema fibra óptica com o uso da técnica de mais simples transmissão elucidando o grande número de aplicações deste recurso, visando à compreensão da irradiação de diferentes sinais radar em fibra óptica.

### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste estudo é evidenciar e sobressaltar a indispensabilidade do estudo da fotônica a fim de atribuir maior clareza sobre as inovações tecnológicas em

processo de transmissão, e geração de sinais em rádio frequência (RF) com emprego de sistemas ópticos que permitirão o aprimoramento de todas as áreas da GE e de defesa do país.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral, faz-se necessário elencar os seguintes objetivos específicos:

- Observar a dispersão cromática;
- Analisar os enlaces analógicos a fibra óptica;
- Explorar os parâmetros de ajuste do enlace; e
- Refletir sobre o enlace com modulação de intensidade e detecção direta.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A exibição do primeiro laser realizada por Theodore Maiman no início da década de 1960, aplicando o laser de Rubi, e o triunfo conseguido com o laser de He-Ne por Ali Javan determinam o começo da era das comunicações ópticas . (SALEH; TEICH, 2007).

A terminologia Fotônica foi empregada nos meados dos anos 70 quando se iniciaram as tentativas de se utilizar esta fonte de radiação em sistemas de comunicação. Esta foi sinalizada como um caminho para o desenvolvimento da área de microondas em futuras comunicações de alta velocidade.

Nesta área, dispositivos a laser semicondutor foram desenvolvidos alguns anos após o anúncio de Maiman, em 1960. Pouco tempo depois, a junção das duas tecnologias (de Meiman com a de Javan) formam um novo tópico multidisciplinar de fotônica em sistemas de RF. Posteriormente, essa área veio a ser intitulada *Microwave Photonics*, englobando o escopo de transmissão de sinais de RF, a geração e o processamento desses sinais na faixa óptica do espectro eletromagnético. (AGRAWAL, 2002).

Este laser foi analisado somente após a metade da década de 60, seguindo uma proposta de Charles Kao e de George Hockham onde a transmissão de sua radiação eletromagnética alcançaria reduzida atenuação em fibras de vidro.

Várias pesquisas foram lançadas por inúmeras organizações para evoluir as fibras de vidro a fim de atingir aplicações em telecomunicações como guias de onda óptica após o

trabalho de Kao ser promulgado. Em 1970, uma companhia dos Estados Unidos da América chamada Corning Glass Works alcançou perdas abaixo de 20 dB/KM, um marco considerado como o alicerce para a aplicação da fibra óptica. (SALEH; TEICH, 2007).

Paralelamente, o aperfeiçoamento da computação e principalmente da eletrônica impactaram as exigências militares e civis de maneira satisfatória.

Os desafios que dos sistemas militares são um pouco semelhantes às necessidades comerciais que estão sendo conduzidas por consumidores. Em essência, exceto por requisitos de confiabilidade muito elevados devido ao fato de operações militares em ambientes hostis, tanto os sistemas civis como militares se sobrepõem em muitos aspectos técnicos.

Entre muitas aplicações aeroespaciais e militares da tecnologia de fibra óptica, nenhuma recebeu o mesmo nível de atenção e apoio de técnicos e governos como o conceito de sistemas de antena de matriz faseada controlados opticamente. A evolução da antena de arranjo em fases, onde uma quantidade significativa de eletrônica é distribuída em toda a entrada. (SENIOR, 2009).

Os dispositivos empregados nos enlaces experimentaram um significativo decréscimo em seu valor e sua oferta no mercado foi extremamente aumentada. Após o avanço obtido com a irradiação de dados digitais, o qual alavancou a transmissão analógica.

Assim, ocorreu a evolução dos itens abrangidos em comunicações ópticas. O desenvolvimento das especificações para um enlace a fibra óptica foi analisada no fim dos anos 80.

O emprego de técnicas de microondas no projeto de itens utilizados em enlaces a fibra óptica de alta velocidade começou a ser estudada através de aplicações em enlaces para a transmissão de sinais analógicos de RF em médias distâncias. E também se deu início à utilização de redes ópticas de sinais de RF em antenas *phased-array*, em modificação aos guias de onda e cabos coaxiais. (SENIOR, 2009).

O enlace para este estudo se caracteriza pela transmissão de um ou mais sinais de RF deslocados em frequência para a faixa óptica. Estando na faixa óptica, estes sinais são multiplexados e acoplados em uma fibra óptica. Ao fim desta propagação, os sinais são demultiplexados e cada um destes é convertido para a sua faixa original de frequência. (SALEH; TEICH, 2007).

A análise de enlace deve levar em conta diversos problemas. Esses problemas podem ocorrer por conta dos seus efeitos não lineares. Pelo fato de serem utilizados moduladores de Mach-Zehnder (MZM) nesse enlace, deve-se controlar a potência gerada nos canais do gerador de sinais complexos. (CARREIRA, 2015).

Outro fenômeno importante é a dispersão. Este fenômeno encontra-se presente em todos os tipos de fibra. Entretanto, dependendo do tamanho do enlace, tal fenômeno não exerce grande influência. Dentre os fatores disponíveis para a apuração da qualidade do enlace, fez-se uso do ganho de potência elétrica. (MAEDA; MONTALTI, 2009).

Três parâmetros do enlace devem ser levados em consideração para evitar os fenômenos não lineares da fibra óptica. São eles: a dispersão cromática, a separação entre canais e a potência da portadora óptica.

Na fibra óptica, devido à multiplexação dos sinais do enlace, destacam-se os seguintes fenômenos: Automodulação de Fase, Modulação de Fase Cruzada, Mistura de Quatro Ondas, Espalhamento Brillouin e Espalhamento Raman. (GONÇALVES, 2014).

Para reduzir alguns fenômenos torna-se primordial respeitar o limiar de potência óptica no acoplamento com a fibra. Todavia limita-se também o ganho do enlace.

Se pegarmos como exemplo as antenas de arranjo de fase, não poderiam ser alcançadas sem a incorporação de uma quantidade significativa de processamento, controle e capacidade de comunicação em cada elemento da matriz ativa.

Está claro como o número de informação aumenta significativamente, há necessidade de alta velocidade nos enlaces envolvidos para a transmissão de dados, onde a interconexão elétrica padrão falha devido a supracitada dispersão, perda e tamanho. Os enlaces de fibra óptica são parte crucial da conexão qualquer sistema distribuído.

Desempenho de componentes ópticos em ambiente militares são discutidos seguidos por questões que poderiam reduzir o custo do alinhamento óptico. Além disso, fase e amplitude do elemento radiante devem ser controladas em tempo real para digitalizar e moldar o feixe irradiado em uma determinada direção.

Em sistemas de multifeixes de fases, os feixes são moldados para diferentes direções no espaço e em várias frequências de operação. Ambas as redes analógicas e digitais de formação de feixes demonstram, no entanto, que se tornou mais atraente perseguir o último. Além disso, prevê-se que as futuras ameaças empregarão medidas de GE para derrotar a eficácia do suporte eletrônico obtido a partir de vários sensores. (AGRAWAL, 2002).

Assim sendo, As medidas do contador eletrônico baseadas nos receptores de aviso de radar são necessárias para envolver simultaneamente uma série de ameaças ativas. É aonde o processamento do sinal óptico claramente evidencia suas vantagens. (SALEH; TEICH, 2007).

Para um sistema eletrônico multifuncional viável a ser usado no futuro antenas de abertura compartilhada, uma rede de distribuição eficaz é necessária para fornecer sinais aos

módulos de entrada e saída. Note que os sinais desejados podem ser obtidos usando a mistura dos dados do sinal com um oscilador local estabilizado. (SENIOR, 2009).

Portanto, para obter um receptor e um transmissor coerentes, cada antena deve ter sua própria antena montada na extremidade dianteira eletrônica, que é composta de circuitos de interface optoeletrônicas, estabilização de osciladores até as frequências desejadas, e misturadores eficientes. (SALEH; TEICH, 2007).

Várias técnicas que permitem geração ótica de sinais e de mixagem optoeletrônica foram desenvolvidas. Um dos métodos mais simples de fornecer enlaces de antena é baseado no conceito de substituição direta das interconexões elétricas. (MAEDA; MONTALTI, 2009).

No entanto, existem desafios associados à confiabilidade de componentes ópticos, custo de integração de sistemas e a arquitetura empregada para alcançar os melhores atributos possíveis. Inovações de dispositivos e confiabilidade: uns grandes números de trabalhos de pesquisa se concentraram nas melhorias do dispositivo para atender ao requisito de desempenho em comunicação comercial por fibra ótica. (SAKAMOTO; FEGADOLLI; OLIVEIRA, 2007).

Como resultado de variações extremas de temperatura, perdas por micromedição terão impacto no desempenho de produtos à base de fibras, enquanto no efeito piroelétrico de guia de onda introduz mudança no fator de acoplamento.

Além disso, radiação impacta em perdas devidas à absorção em fibras ópticas e perdas de acoplamento devido à mudança no índice de refração como resultado do efeito foto refrativo em guias de onda isolados. Por outro lado, fontes ópticas e amplificadores baseados em semicondutores sofrem alterações devido à variação de temperatura. O impacto da radiação nos semicondutores é o aumento do ruído e mudança na absorção em fotodiodos e moduladores. (GONÇALVES, 2014).

Fontes ópticas e amplificadores sofrem de mudança de ganho, modificando, portanto, seu desempenho dinâmico. Naturalmente, Existem soluções propostas associadas a cada problema. Devido ao impacto da radiação e temperatura em guias de onda isolados, em fibra ótica, um dB a melhoria no acoplamento óptico melhora o ganho em 2 dB. (MAEDA; MONTALTI, 2009).

No entanto, as tolerâncias de fibras ópticas e fontes estão em faixas baixas, tornando o baixo custo de integração de componentes ópticos com fibras ópticas desafiando o valor mínimo. Mais sobre isso o processo tem que ser feito de maneira econômica.

Outro aspecto importante do acoplamento é que a reflexão tem que ser minimizada. Portanto, isoladores ópticos combinados com fibras de ângulo polido são

necessários para reduza o nível de reflexão da luz abaixo de 50 dB em certas aplicações. Outro aspecto importante é o controle de temperatura de dispositivos semicondutores para evitar qualquer sensibilidade à temperatura em ambientes de espaço pequeno. (URICK; SWINGEN; ROGGE; CAMPILLO; BUCHOLTZ; DEXTER, 2005).

Como exemplo, temos o laser semiconductor que possui essa estrutura baseada em cascatear um laser de número com cavidade monoliticamente longa em série, aumentando a resistência da junção P-N, mantendo a mesma corrente, modulando todas as seções de ganho. (SALEH; TEICH, 2007).

Finalmente, o acoplamento de fibra é alcançado de forma rentável através da combinação de um número de fibras montadas em um sulco em V de silício. Este processo permitirá um grande número de fontes de diodo laser. (SAKAMOTO; FEGADOLLI; OLIVEIRA, 2007).

A linearidade e a dispersão cromática também limitam o ganho do enlace a fibra óptica. De acordo com alguns resultados chegou-se a conclusão que, devido ao baixo comprimento do enlace, que a dispersão e os fenômenos não lineares da fibra não provocariam grandes danos a potência da portadora óptica para determinados valores.

O ganho de potência para este enlace a fibra óptica também possui valor mais elevado em comparação com outros tipos de cabos para a faixa de frequência de 0,5 a 20 GHz. Os resultados para o método de cálculo aplicando teoremas matemáticos alcançaram os mesmos resultados pela aproximação para pequenos sinais, entretanto não ocorreu a transferência de energia da componente fundamental para as outras componentes. (MAEDA; MONTALTI, 2009).

Com os limites de potência, dispersão e espaçamento entre canais ópticos sendo considerados, concluiu-se que o enlace se apresenta aproximadamente linear.

Esse grau de linearidade permite a veracidade do sinal para esta aplicação. E com estes resultados obtiveram-se as respostas positivas em relação à utilização de enlace à fibra óptica em transmissão de sinais complexos para avaliação operacional de sensores de GE.

Podem-se citar diversos grupos que estão patrocinando estudos deste assunto, tais como, o Ministério da Defesa Israelense (IMOD) e o Departamento de Defesa dos EUA (DoD). (GONÇALVES, 2014).

Estes vêm desenvolvendo diversos projetos tais como, barramentos de banda larga para diversos sensores, formadores de feixe eletrônico para radares com antenas à *Phased-Array* e sistemas com formadores de feixes para sensores aerotransportados em Veículos Aéreos Não Tripulados e Aeronaves de Alarme Aéreo Antecipado e Controle .

### **3. METODOLOGIA**

A revisão bibliográfica é a análise meticulosa, crítica e abrangente das publicações existentes em uma determinada área do conhecimento, no caso em tela, os enlaces a fibra óptica.

A pesquisa bibliográfica visa à explicação e à discussão de um tema, baseando-se em referências teóricas publicadas em revista, artigos, periódicos, livros e outros. Busca, ainda, a análise e o conhecimento de conteúdos científicos acerca de determinado tema, tendo como fim fazer com que o pesquisador se depare diretamente com tudo que foi publicado sobre um assunto.

Sendo assim a pesquisa possui o propósito de averiguar as verdades para certo problema. Para tal fim, realiza-se um desenvolvimento encaminhado por meio de uma coerência de pensamento, que se espelha em um método científico. (VERGARA, 2014)

#### **3.1 Classificação da Pesquisa**

Existem dois critérios básicos para categorizar uma pesquisa: quanto aos fins e quanto aos meios. Em uma mesma pesquisa podem-se apresentar os dados de maneira estatística e não estatística. Neste estudo os dados foram tratados de forma não estatística. O tratamento das informações obtidas foi realizado de forma qualitativa, porquanto que fosse alcançada uma perspectiva subjetiva dos resultados.

##### **3.1.1 Quanto aos fins**

Quanto aos fins, a pesquisa pode ser classificada como descritiva e explicativa. Descritiva, porque expõe sobre os conceitos de processamento de sinais por sistemas fotônicos, apresentar as melhorias dos futuros receptores e sobre as perspectivas futuras dos transmissores. Outra qualidade que também a classifica como descritiva, está no fato de que a mesma estabelece uma comparação entre os enlaces comuns e os enlaces a fibra óptica.

Finalmente, quanto aos fins, a pesquisa também é classificada como explicativa, pois visa elucidar quais as técnicas fundamentais devem estar presentes nos sensores para que os mesmos possam ser utilizados em combate e garantir o seu aproveitamento.

### 3.1.2 Quanto aos meios

Quanto aos meios a pesquisa será bibliográfica, pois será realizada uma revisão literária sobre o processamento de sinais em fibra óptica, comparar os sistemas atuais com os futuros sistemas empregados, a fim de buscar através de artigos científicos, trabalhos anteriores, livros, dissertações, enfim todo material acessível ao público em geral para fundamentar teoricamente o trabalho realizado.

Após o levantamento da revisão literária, a fim de possibilitar chegar a conclusões práticas sobre a utilização dos enlaces a fibra óptica. Desta maneira, será possível chegar a uma conclusão sobre a evolução prevista.

## 3.2 Limitações do Método

A presente pesquisa se limita a análise bibliográfica, onde são abordados importantes temas a respeito do assunto em questão, por meio de resultados obtidos em artigos publicados. Todavia não é realizado um estudo de campo, onde se pode verificar a aplicação prática dessas novas tecnologias haja vista que nenhuma classe de navios da Marinha do Brasil possui algum tipo de sensor fotônico ou enlaces que utilizam essa tecnologia. Com isso, o estudo torna-se basicamente teórico, porém seria desejável realizar um estudo de campo com os equipamentos apropriados, a fim de alcançar resultados próximos dos resultados verificados com a real utilização.

A metodologia de pesquisa documental é essencial para a ampliação do trabalho, mas ao mesmo tempo, torna mais elaborada uma abordagem particularizada em função da dificuldade de acesso a determinadas pesquisas e seus resultados em função do caráter fundamentalmente estratégico desses assuntos. Porém o material adquirido torna-se suficiente para uma compreensão efetiva, gerando assim, um enfoque fundamentado em trabalhos e artigos já existentes.

## 3.3 Coleta e Tratamento de Dados

Inicialmente foi realizado um levantamento do referencial teórico a respeito do assunto abordado. Trabalhos, artigos e pesquisas publicadas sobre o tema em questão, tendo em vista que são fontes valiosas de informações. Visitas ao Centro de Guerra Eletrônica da

Marinha (CGEM) também serviram de fonte para a coleta de dados, buscando a opinião e experiência de profissionais da área de GE, a respeito dessas novas tecnologias, bem como especificações técnicas.

Posteriormente a coleta dos dados, foi realizada uma apreciação a fim de se reunir o conteúdo que realmente irá compor o trabalho. Desta forma, foi alcançada uma síntese de todo o conteúdo, visando concluir o assunto de forma clara e objetiva, e que possa atender os interesses da Marinha do Brasil.

## **4. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

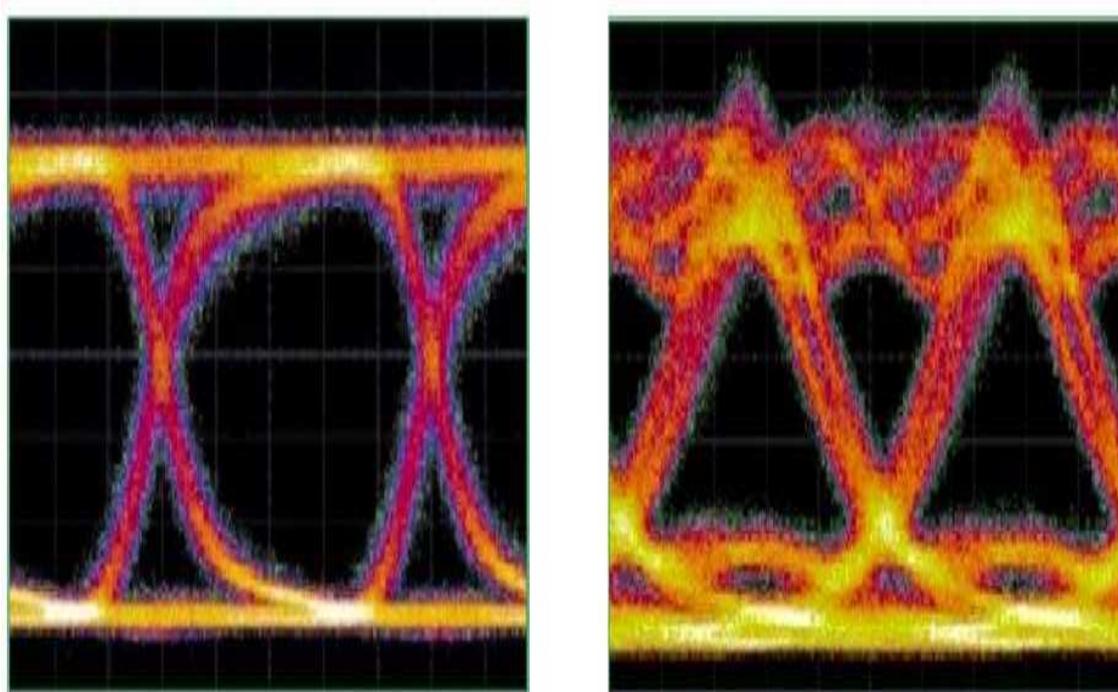
Com base na pesquisa realizada, a forma de abordagem nos seguintes tópicos torna-se fundamental para o completo entendimento do assunto.

### **4.1 Dispersão Cromática**

Dispersão cromática pode ocorrer em todos os tipos de fibra óptica. Como as fontes ópticas não emitem apenas uma frequência única, mas uma banda de frequências, então pode haver diferenças de atraso de propagação entre os diferentes componentes espectrais do sinal transmitido. Isso faz com que o alargamento de cada modo de transmissão e, portanto, dispersão intramodal. As diferenças de atraso podem ser causadas pelas propriedades dispersivas do material guia de ondas (dispersão do material) e também feitas na estrutura da fibra (dispersão de guia de ondas). (SAKAMOTO; FEGADOLLI; OLIVEIRA, 2007).

Então a dispersão cromática em uma propagação de um pulso de luz em uma fibra óptica é causada pelas diferentes velocidades de propagação dos diferentes comprimentos de onda que compõem o espectro do sinal de origem. Dependendo do formato de modulação empregado, produz efeitos na amplitude e na fase do sinal detectado. Estes efeitos podem ser desejáveis ou indesejáveis, de acordo com a aplicação.

Figura 4.1 – Dispersão Cromática



Fonte: MAEDA; MONTALTI (2009)

Na figura acima temos o pulso da esquerda sem a dispersão cromática e o pulso da direita sob o efeito desse fenômeno. Na qual podemos perceber a principal consequência da dispersão cromática que é a ampliação dos impulsos transmitidos.

## 4.2 Enlaces Analógicos a Fibra Óptica

A comunicação usando uma onda portadora óptica guiada ao longo de uma fibra de vidro tem um número de características extremamente atraentes. Os avanços na tecnologia atualmente ultrapassaram até mesmo as previsões mais otimistas, criando vantagens adicionais. Por isso, é útil considerar os méritos e as características especiais oferecidas pelas comunicações de fibra óptica mais convencional.

A frequência da portadora óptica no intervalo de  $10^{13}$  a  $10^{16}$  hertz (Hz) (geralmente no infravermelho próximo em torno de  $10^{14}$  Hz ou 105 GHz) rende muito mais largura de banda de transmissão do que os sistemas de cabos metálicos (por exemplo, largura de banda do cabo coaxial tipicamente em torno de 20 megahertz (MHz) em distâncias até um máximo de 10 KM ou mesmo em sistemas de rádio de ondas (ou seja, sistemas operando atualmente com larguras de 700 MHz em algumas centenas de metros). (SAKAMOTO; FEGADOLLI; OLIVEIRA, 2007).

De fato, até o ano 2000, a largura de banda típica multiplicada pelo comprimento do enlace a fibra óptica foi de 5000 GHz KM em comparação com o produto típico de largura de banda para cabo coaxial de cerca de 100 MHz KM. Assim, a fibra óptica já estava demonstrando um fator de 50.000 de melhoria de largura de banda sobre o cabo coaxial, enquanto também fornecendo essa capacidade superior de transporte de informações por distâncias de transmissão muito maiores. (URICK; SWINGEN; ROGGE; CAMPILLO; BUCHOLTZ; DEXTER, 2005).

Embora a largura de banda de fibra seja estendida ainda mais, é claro que este parâmetro é limitado pelo uso de um único sinal de portadora óptica. Assim, uma utilização de largura de banda muito melhorada para uma fibra óptica pode ser transmitindo vários sinais ópticos, cada um em diferentes comprimentos de onda, em paralelo usando a mesma fibra. (CARREIRA, 2015).

Esta operação multiplexada (como exemplo podemos aplicar a técnica WDM por meio do equipamento AWG) por divisão de comprimento de onda, com denso empacotamento dos comprimentos de onda ópticos, oferece o potencial para uma capacidade de transporte de informação de fibra que é muitas ordens de magnitude em excesso daquela obtida usando cabos de cobre ou um sistema de rádio de banda larga. (GONÇALVES; CARREIRA; SANTOS; PEREIRA; COUTINHO; OLIVEIRA, 2014).

As fibras ópticas têm diâmetros muito pequenos que são frequentemente não maiores que o diâmetro de um cabelo humano. Assim, mesmo quando essas fibras sejam cobertas com revestimentos de proteção (além da casca já presente em sua estrutura) elas são muito menores e muito mais leves que outros tipos de cabos. (SALEH; TEICH, 2007).

Este é um tremendo benefício para aliviar o congestionamento de dutos em lugares pequenos, bem como permitindo uma expansão da transmissão de sinal dentro de aeronaves, satélites e navios.

Fibras ópticas são fabricadas em vidro, ou às vezes em polímero plástico, são isoladas eletricamente e, portanto problemas de interface não ocorrem. Além disso, esta propriedade faz a transmissão em fibra óptica ideal para comunicação em ambientes eletricamente perigosos.

Formam um guia de ondas dielétrico e estão, portanto, livres de interferência eletromagnética, interferência de radiofrequência. Daí o a operação de um sistema de comunicação de fibra óptica não é afetada pela transmissão um ambiente eletricamente ruidoso e o cabo de fibra não requer blindagem. (GONÇALVES, 2014).

Além disso, é bastante fácil garantir que não haja interferência óptica entre fibras e, portanto, ao contrário de comunicação usando condutores elétricos, a interferência entre as fibras é insignificante, mesmo quando muitas fibras são cabeadas juntas.

Ao contrário da transmissão em cabos de cobre, um sinal óptico transmitido não pode ser obtido de uma fibra de maneira não invasiva (isto é, sem tirar energia óptica da fibra). Portanto, em teoria, qualquer tentativa de adquirir um sinal de mensagem transmitido opticamente pode ser detectada. Esse recurso é obviamente interessante para transmissão de dados estratégicos e outras aplicações que necessitam de discrição. (AGRAWAL, 2002).

O desenvolvimento de fibras ópticas nos últimos 20 anos tem resultado na produção de cabos de fibra óptica que apresentam atenuação muito baixa ou perda de transmissão em comparação com os melhores condutores de cobre.

Fibras foram fabricadas com perdas tão baixas quanto 0,15 dB/KM e esse recurso tornar-se uma grande vantagem das comunicações em fibra óptica. Facilita o uso de enlaces de comunicação com repetidores ópticos assim reduzindo o custo e a complexidade do sistema. (SALEH; TEICH, 2007).

Conjuntamente com a modulação e a já comprovada capacidade de largura de banda de cabos de fibra, esta propriedade forneceu um caso totalmente convincente para a adoção de comunicações por fibra óptica na maioria das telecomunicações de longa distância, substituindo não só os cabos de cobre, mas também as comunicações por satélite, consequência do atraso muito perceptível incorrido pela transmissão de voz ao usar esta última abordagem. (URICK; SWINGEN; ROGGE; CAMPILLO; BUCHOLTZ; DEXTER, 2005).

Embora os revestimentos de proteção (além da casca presente) sejam essenciais, as fibras ópticas podem ser fabricadas com resistências à tração muito altas. Talvez surpreendentemente para uma substância vítrea, as fibras também podem ser dobradas para raios muito pequenos ou torcidas sem danos. Além disso, estruturas de cabos foram desenvolvidas de maneira que se mostraram flexíveis, compactas e extremamente robustas. (SENIOR; 2009).

Contando o tamanho e o peso, estes cabos de fibra óptica são geralmente superiores em termos de armazenamento, transporte, manuseio e instalação em comparação com os cabos de cobre correspondentes, exibindo menos resistência e durabilidade.

A propriedade de baixa perda de cabos de fibra óptica que reduz a necessidade de repetidores intermediários ou amplificadores de linha para aumentar a força do sinal transmitido. Por isso, com menos repetidores ópticos ou amplificadores, a confiabilidade do

sistema é geralmente melhorada em comparação com sistemas condutores elétricos convencionais. (BARZANJEH; GUHA; WEEDBROOK, 2015).

Além disso, a confiabilidade dos componentes não é mais um problema com vidas previstas de 20 a 30 anos sendo bastante comum. Esses dois fatores tendem a reduzir o tempo e os custos de manutenção. (JÚNIOR; COUTINHO; MARTINS; FEGGADOLLI; RIBEIRO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2013).

O vidro que geralmente fornece a transmissão de fibra óptica é feito de areia que não é um recurso escasso. Então, em comparação com os condutores de cobre, as fibras ópticas oferecem o potencial para comunicação de linha de baixo custo. Embora nos últimos anos, este potencial foi amplamente alcançado impactando nos custos da transmissão de fibra óptica que para compras a granel tornou-se competitivo com fios de cobre (ou seja, pares trançados), ainda não foi alcançado em todas as outras áreas componentes associadas com comunicações de fibra óptica. (MAEDA; MONTALTI, 2009).

Por exemplo, os custos do semicondutor de alto desempenho lasers e fotodiodos detectores ainda são relativamente altos, assim como alguns itens utilizados em conexões (conectores desmontáveis, acopladores, etc.). (SENIOR; 2009).

Custos gerais do sistema ao utilizar comunicação de fibra óptica em enlaces de longa distância, no entanto, são substancialmente menores do que aqueles para sistemas de linha elétrica equivalente por causa de as propriedades de baixa perda e banda larga do meio de transmissão óptico.

A exigência de repetidores intermediários e da eletrônica associada é reduzida, dando uma vantagem de custo substancial. Embora esse custo beneficie um ganho líquido de longo prazo, nem sempre é o caso em aplicações de curta distância, onde o custo adicional, devido à conversão elétrico-ótica (e vice-versa), pode ser um fator decisivo. (BARZANJEH; GUHA; WEEDBROOK, 2015).

No entanto, existem outras vantagens de custo que tornam possíveis. Principalmente, em relação a transporte, manuseio, instalação e manutenção, bem como as características que possam provar significativa à escolha do sistema.

A transmissão de alcance relativamente curto exige torres aéreas caras em intervalos não superiores a algumas dezenas de quilômetros. Assim, com exceção da rede de acesso de telecomunicações, devido principalmente às restrições de custo instaladas, a fibra óptica tornou-se o meio de transmissão dominante dentro das principais sociedades industrializadas.

Os enlaces analógicos a fibra óptica mais abordada na literatura empregam, em sua maioria, a modulação externa de intensidade, através de um MMZ, e a detecção direta.

Com o objetivo de alcançar melhores resultados dos parâmetros de desempenho, tem sido utilizadas técnicas de detecção alternativas, como por exemplo, detecção balanceada. Combinações entre as técnicas de detecção e os formatos de modulação também tem sido apresentadas. (JÚNIOR; COUTINHO; MARTINS; FEGGADOLLI; RIBEIRO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2013).

### **4.3 Parâmetros de Ajuste do Enlace**

O enlace MIDD é composto por um laser, um MMZ, um determinado comprimento de fibra óptica e um fotodetector. Esta seção trata especificamente do MMZ, aonde é definido o formato de modulação desejado.

O modulador MMZ é um dispositivo não linear e como este trabalho está relacionado na operação deste equipamento em um regime próximo da linearidade, almejou-se estabelecer quantitativamente este regime. Foi optado realizar esta análise quantitativa a respeito de sua linearidade apoiada no método de análise de um dispositivo genérico com a sua equação característica referente à potência óptica de saída conhecida. (CARREIRA, 2015).

Além da fibra óptica não ser linear, de acordo com o descrito no item anterior, o modulador também não é linear e deve atuar no regime de pequenos sinais para mantê-lo com uma resposta quase linear. Para esta abordagem, o sistema atua no regime de pequenos sinais. Relembrando, o regime de pequenos sinais é estabelecido quando o índice de modulação é muito menor que a unidade. (BARZANJEH; GUHA; WEEDBROOK, 2015).

A não linearidade do MMZ não provém do material, mas sim da sua função característica senoidal quadrática, o que acarreta distorções por harmônicos das frequências dos sinais modulantes e produto de intermodulação. (JÚNIOR; COUTINHO; MARTINS; FEGGADOLLI; RIBEIRO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2013).

A solução da equação característica deste modulador apresenta o ponto de quadratura do modulador, que representa a metade da potência óptica na saída do mesmo.

Deve-se monitorar a potência entregue aos canais do gerador de sinais complexos. Isto porque, o índice de modulação é subordinado a este fator e a linearidade do modulador obedece este índice.

Com base na literatura, a obtenção de alguns formatos de modulação para a transmissão de sinais analógica é alcançada mediante o ajuste dos seguintes parâmetros: a diferença de fase entre os sinais modulados e a diferença de fase produzida pelas tensões aplicada nos braços do MMZ. (CARREIRA, 2015).

#### **4.4 Enlace com Modulação de Intensidade e Detecção Direta**

Como já exposto, o enlace MIDD é o mais encontrado na literatura. Devido as suas diversas aplicações quando comparado com as demais arquiteturas, o mesmo apresenta um nível de complexidade menor.

Para permitir o sucesso da incorporação de todos os componentes em um sistema de comunicação de fibra óptica é necessário considerar a interação de um componente com o outro, e então avaliar o desempenho geral do sistema. (MAEDA; MONTALTI, 2009).

Além disso, para aperfeiçoar o desempenho do sistema para uma dada aplicação é frequentemente útil compensar uma característica específica do componente e negociá-lo com o desempenho de outro componente, a fim de fornecer um ganho dentro do sistema geral.

Os componentes eletrônicos desempenham um papel importante nesse contexto, permitindo ao projetista de sistemas escolhas adicionais que, dependendo dos componentes utilizados, podem melhorar o desempenho do sistema.

Pretende-se que esta seção forneça orientação em relação aos vários componentes possíveis em configurações que podem ser utilizadas para diferentes aplicações, enquanto também dá uma visão sobre a maneira de configuração do sistema.

Embora o tratamento não seja de forma alguma exaustivo, indicará os vários problemas envolvidos no projeto do sistema e fornecerá uma descrição sobre as técnicas e práticas básicas que podem ser adotadas para permitir o sucesso do sistema.

Antes que qualquer procedimento de arquitetura do sistema possa ser iniciado, é essencial que os requisitos do sistema sejam especificados. Estas especificações incluem: tipo de transmissão; largura de banda de transmissão requerida; tamanho adequado entre o equipamento terminal ou os repetidores intermédios; custo; e confiabilidade. (GONÇALVES; CARREIRA; SANTOS; PEREIRA; COUTINHO; OLIVEIRA, 2014).

Entretanto, o uso exclusivo das especificações acima pressupõe inerentemente que os componentes disponíveis permitem que qualquer sistema, uma vez especificado, seja projetado e implementado.

Infelizmente, nem sempre é esse o caso, especialmente quando o resultado desejado é um sistema de banda larga e longa distância (grande quantidade de fibra óptica). Nesse caso, pode ser necessário fazer escolhas considerando fatores como disponibilidade, confiabilidade, custo e facilidade de instalação e operação. (GONÇALVES, 2014).

Uma abordagem semelhante deve ser adotada em aplicações de menor largura de banda, menores distâncias, onde há uma necessidade de uso de componentes específicos que podem restringir o desempenho do sistema. Por isso, é provável que o projetista do sistema ache necessário considerar as escolhas de componentes em conjunto com os requisitos básicos do sistema. (JÚNIOR; COUTINHO; MARTINS; FEGGADOLLI; RIBEIRO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2013).

Por isso, as principais escolhas de componentes são: tipo de fibra óptica e seus respectivos parâmetros; tipo de fonte de transmissão e suas características; configuração do transmissor; configuração do receptor; Modulação e codificação. (GONÇALVES, 2014).

A fim de maximizar a transferência de informações através de um enlace é comum multiplexar vários sinais em uma única fibra. É possível transmitir estes sinais multicanais por multiplexação no tempo ou no domínio da frequência.

Vários canais de banda base podem ser combinados por divisão de frequência. A largura de banda do canal óptico é dividida em várias bandas de frequências não sobrepostas e cada sinal é atribuído a uma destas bandas de frequências.

Os sinais individuais podem ser extraídos do sinal combinado. A filtragem elétrica apropriada ocorre no terminal de recepção. Portanto, no MIDD é geralmente realizado eletricamente no terminal de transmissão antes da modulação de intensidade de uma única fonte óptica. (CARREIRA, 2015).

No entanto, é possível utilizar várias fontes ópticas, cada um operando em um comprimento de onda diferente em um único enlace de fibra. Nesta técnica, muitas vezes conhecido como multiplexação por divisão de comprimento de onda, a separação e extração dos sinais multiplexados (isto é, separação do comprimento de onda) são realizados com filtros ópticos.

Finalmente, uma técnica de multiplexação que não envolve a aplicação de vários sinais de mensagem em uma única fibra é conhecida como multiplexação por divisão de espaço. Cada canal de sinal é transportado em uma fibra separada dentro de um feixe de fibras

ou forma de cabo multifibra. (JÚNIOR; COUTINHO; MARTINS; FEGGADOLLI; RIBEIRO; ALMEIDA; OLIVEIRA, 2013).

O bom isolamento óptico oferecido pelas fibras significa que o acoplamento cruzado entre os canais pode ser insignificante. No entanto, esta técnica exige um aumento no número de componentes ópticos necessários (por exemplo, fibra, conectores, fontes, detectores) dentro de um sistema particular e, portanto, não tem sido amplamente utilizado atualmente.

Portanto, transmissão de fibra óptica analógica sem dúvida, tem um papel a desempenhar nas futuras redes de comunicação, em situações em que a ligação de fibra óptica faz parte de uma rede analógica maior.

O uso de transmissão analógica nessas áreas evita o custo e complexidade do equipamento digital, bem como a degradação devido ao ruído de quantificação. Em especial podemos elencar o caso da transmissão de sinais de vídeo em curtas distâncias onde o custo dos conversores alta velocidade geralmente não é justificado.

O sinal analógico pode ser transmitido dentro de um sistema de comunicação de fibra óptica usando uma das várias técnicas de modulação. A forma mais simples de modulação analógica para as comunicações de fibra óptica é a modulação de intensidade direta da fonte ótica. (SALEH; TEICH, 2007).

Nesta técnica, a saída óptica da fonte é modulada simplesmente pela variação da corrente fluindo no dispositivo em torno de um viés adequado ou nível médio em proporção à mensagem. Portanto, o sinal de informação é transmitido diretamente na banda base.

Alternativamente, o sinal de banda base pode ser traduzido para outra portadora por meio de amplitude, fase ou modulação de frequência usando técnicas padrão, antes da modulação de intensidade da fonte óptica.

Modulação direta da fonte óptica em frequência, fase ou polarização, em vez de por intensidade requer que estes parâmetros sejam bem definidos em todo o sistema de fibra ótica. Há muito interesse nesta área e a tecnologia de componentes ópticos foi desenvolvida a fim de permitir a implementação prática do sistema.

No entanto, deve-se tomar cuidado extra para garantir que a fonte óptica e, em menor grau, o detector tenham características lineares de entrada e saída, a fim de evitar a distorção do sinal óptico transmitido. (SALEH; TEICH, 2007).

Consequentemente, os sistemas analógicos tendem a possuir uma distância de transmissão limitada sem repetidores que geralmente proíbem seu uso para aplicações de longa distância.

A modulação de intensidade direta da fonte óptica é adequada para a transmissão de uma banda base de sinal analógico. No entanto, se a natureza de banda larga do meio de fibra óptica for totalmente utilizada, é essencial que vários canais de banda base sejam multiplexados em ligação de fibra única. (CARREIRA, 2015).

Isto pode ser conseguido com a transmissão analógica através da divisão de frequência multiplexação dos canais de banda base individuais. Inicialmente, os canais de banda base devem ser transferidos para portadoras de diferentes frequências por modulação de amplitude, modulação de frequência ou modulação de fase antes de ser simultaneamente transmitido como um sinal de multiplexação por divisão de frequência.

A transmissão de frequência pode ser executada no regime elétrico onde os sinais analógicos da banda base modulam outras portadoras e, em seguida, são multiplexadas por divisão de frequência para formar um sinal antes da modulação da intensidade da fonte óptica.

No entanto, os sistemas podem incorporar dois níveis de modulação elétrica através da qual os canais de banda base são inicialmente modulados em amplitude antes de modulação em fase ou até mesmo da modulação em frequência. (SALEH; TEICH, 2007).

O sinal assim obtido é então usado para a ser modulado em intensidade por meio da fonte óptica. No terminal de recepção, o sinal óptico transmitido é detectado antes da demodulação elétrica e filtragem para obter originalmente o sinal transmitido em banda base. Outra grande vantagem da modulação da intensidade de outras portadoras é a possível melhora na relação sinal/ruído que pode ser obtida durante a demodulação. (SALEH; TEICH, 2007).

Embora muito variantes ou topologias híbridas tenham sido exploradas, as três arquiteturas básicas de sistema compreendem as configurações em anel, barramento e estrela.

A primeira topologia, que em grande parte encontrou aplicação como um caminho fechado onde consecutivo nós ou terminais são conectados por uma série de enlaces de fibra, é discutido em relação à interface de dados distribuídos de fibra coberta. (URICK; SWINGEN; ROGGE; CAMPILLO; BUCHOLTZ; DEXTER, 2005).

Com as outras duas topologias, no entanto, progressos substanciais foram alcançados na realização de sistemas e redes de distribuição que não compreendem simplesmente uma série de enlaces ponto a ponto.

Com base em um circuito teórico é possível observar que o sinal é dividido e defasado, os quais incidem no modulador nas duas entradas, juntamente com a tensão coincidente.

Estes sinais modulam uma portadora óptica proveniente do laser, e no caso em questão, o campo modulado deixa o modulador por somente uma saída, atravessando um comprimento de fibra óptica ate encontrar o fotodetector, onde ocorre a demodulação. (URICK; SWINGEN; ROGGE; CAMPILLO; BUCHOLTZ; DEXTER, 2005).

Antes de calcular a potência disponibilizada pelo enlace, é importante analisar o detector deste circuito. Muitas técnicas são empregadas para o empacotamento de fotodiodos, de forma que se obtenha a máxima frequência e desempenho em termos de energia.

O campo elétrico de saída do modulador sofre interferência da atenuação e da constante de fase ao longo de todo trecho de fibra percorrido ate a incidência no fotodetector. Com o objetivo de inserir o coeficiente de dispersão de primeira ordem no modelo pode-se observar um somatório duplo de termos infinitos. (SALEH; TEICH, 2007).

Sobre esse aspecto, na literatura, a utilização para pequenos sinais com o objetivo de obter o comportamento dos componentes espectrais. Todavia essa aproximação implica em uma limitação da apreciação para índices de modulação reduzidos.

Negligenciando por enquanto o ruído introduzido pela amplificação óptica e não lineares de fibra, há quatro fontes de ruído em um enlace fotônico de canal único: entrada de ruído térmico, saída térmica ruído, ruído de disparo do detector e ruído de intensidade relativa do laser. (SENIOR; 2009).

Desta forma têm sido aplicados diversos teoremas de matemática avançada, visando não inserir tal limitação ao modelo. Podendo assim ser utilizado qualquer índice de modulação, bem como realizar a variação dos coeficientes de acoplamento e também permite analisar os diversos formatos de modulação, além dos efeitos da atenuação e da dispersão na fibra óptica. (CARREIRA, 2015).

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico sobre enlaces a fibra óptica, com o objetivo de evidenciar suas vantagens mesmo nos enlaces mais simples como o MIDD.

Atualmente uma articulação industrial/militar visando à aproximação da fotônica com outros sistemas para ampliar a largura de banda para irradiação de sinais, diminuir a dimensão dos equipamentos e a redução da dispersão de potência de sistemas de microondas.

Componentes fotônicos são consideravelmente mais leves comparando-os com os usados atualmente para a faixa de frequência, os mesmos não padecem de interferência eletromagnética e são isentos a pulso eletromagnético. (DARYOUSH, 2007)

Os criadores de projetos podem aproveitar a fibra óptica para arquitetar barramentos juntos ou mesmo cruzando tanques de óleo combustível, sem a ameaça de explosão ou incêndio. A fibra óptica não é condutora, logo não gera faíscas. Pode, por exemplo, reduzir o peso de barramentos de radares complexos e dos sistemas de GE em aviões e navios, que podem ser trocados por poucas fibras ópticas.

Pode-se concluir que é promissor e viável o emprego de transmissão de sinais em situações em que os cabos coaxiais ou guias de onda apresentam atenuação expressiva, causadas em decorrência da elevada faixa de frequência. Mesmo operando em frequências mais baixas, o emprego de enlace a fibra óptica pode vir a ser viável para o caso de enlaces com longos comprimentos.

Todos os sistemas baseados em arquiteturas para converter um sinal em um sinal óptico visando a sua propagação em uma fibra óptica possuem benefícios, felizmente, têm sido aproveitados por projetistas militares de sistemas. Ressalta-se que essas configurações podem empregar a técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda para dar suporte ao atendimento de requisitos cada vez mais rigorosos quanto a peso, custo e largura de banda.

Surgiram utilidades da fotônica em sistemas de transmissão e recepção de sinais para antenas remotas situadas a médias distâncias, transmissão e distribuição de sinais, radares, osciladores, em antenas *phased-array*, misturadores, e filtros. O uso de enlaces a fibra óptica em sistemas de distribuição em redes de televisão a cabo e sistemas de telefonia celular são tecnologias notáveis e que demonstram o potencial da área.

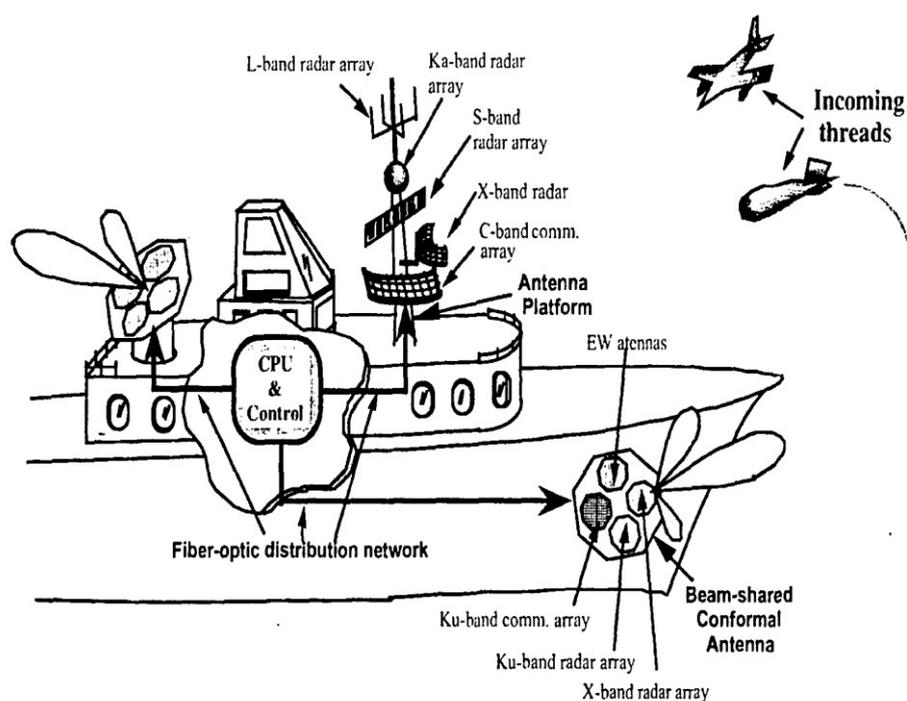
Nessa conjuntura, a MB pode se favorecer desses conhecimentos e acompanhar essa tendência. Estes se tornam aplicáveis tanto à sua tarefa de fiscalizar o território nacional, o mar territorial e a nossa zona econômica exclusiva, assim como construir meios com novas tecnologias para cumprir seu dever.

## 5.1 Considerações Finais

As direções das pesquisas são em desenvolver novos dispositivos que possam atender as demandas por alto desempenho e de baixo custo. O ambiente militar também afeta o arquitetura de redes de distribuição de fibra óptica.

Entre as tecnologias entra em questão o processamento de sinal óptico que poderia levar a produtos de grande largura de banda, resultando assim em alta seletividade de frequência. Filtros transversais, linhas de atraso são soluções atrativas que comandam mercado sobre as técnicas de processamento de sinal elétrico.

Figura 5.1 – Navio com Cabeamento à Fibra óptica



Fonte: DARYOUSH (2007)

A figura acima representa o que se espera futuramente com a aplicação das fibras ópticas, os quais são vários sensores interligados por meio desses tipos de cabos proporcionando uma alta taxa de dados, uma menor perda de informações, assim gerando ao meio militar um aumento no tempo de reação.

## 5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Observando a importância cada vez maior da fotônica no conjuntura militar e as inovações tecnológicas existentes se pode concluir que o futuro desse setor são os sensores

cada vez mais precisos. Pois permitirão explorar de maneira mais inteligente o espectro eletromagnético, gerando transmissores cada vez mais estáveis (BARZANJEH; GUHA; WEEDBROOK, 2015).

Necessita-se acrescentar também a evolução dos receptores que necessitarão possuir um desempenho cada vez melhor. Outro possível trabalho pode ser realizado no equipamento radar utilizando a tecnologia fotônica de processamento de sinais.

Acrescenta-se uma redução nos custos dos processos envolvidos devido à ampla utilização deste tipo de tecnologia. Dessa forma admitindo um número reduzido na probabilidade de erro. Sugere-se como ponto de partida o estudo da variação de fase nos canais ópticos. Assim, qualquer enfoque nas técnicas abordadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication System**. 3. ed. New York, New York, United States of America: John Wiley & Sons, 2002.

BARZANJEH, S.; GUHA, S.; WEEDBROOK, C. **Quantum Illumination at the Microwave Wavelengths**. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/>>. Acesso em 12 Jan. 2018.

CARREIRA, R. R. **Estudo comparativo de enlaces analógicos a fibra óptica empregando modulação externa e várias técnicas de detecção**. 2015. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2015.

DARYOUSH, A. S. **Microwave Photonics in Dual-Use Military Systems - A Personal Perspective**. Drexel University, Philadelphia, USA, 2007.

GONÇALVES, ANDRÉ PAIM. **Estudo experimental de enlace analógico a fibra óptica empregando WDM e sinal de RF multi-espectral**. 2014. 171f. Dissertação (Mestrado em Micro-ondas e Opto-eletrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2014.

GONÇALVES, A. P.; CARREIRA, R. R.; SANTOS, A. R.; PEREIRA, T. S. M.; COUTINHO, O. L.; OLIVEIRA, J. E. B. **Estudo para Emprego de Enlace Analógico à Fibra Óptica por WDM de Múltiplos Sinais de RF em Avaliações Operacionais de Meios Navais**. São José dos Campos, São Paulo, 2014.

JÚNIOR, A. A. F.; COUTINHO, O. L.; MARTINS, C. S.; FEGADOLLI, W. S.; RIBEIRO, J. A. J.; ALMEIDA, V. R.; OLIVEIRA, J. E. B. **Effect of Fiber Optic Chromatic Dispersion on the Performance of Analog Optical Link with External Modulation Aiming at Aerospace Applications**. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v.5, n.2, p.205-216, Apr.-Jun. 2013.

MAEDA, Y.; MONTALTI, F. **Optical fibres, cables and system**. ITU-T MANUAL, 2009.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of photonics**. 2. ed. Hoboken, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, 2007.

SAKAMOTO, B. F. R.; FEGADOLLI, W.; OLIVEIRA, J. E. B. **Emprego Militar de Comunicação Óptica em Espaço Livre – FSO**. Simpósio de aplicações Operacionais em área de defesa, 9., 2007, São José dos Campos. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

SENIOR, J. M. **Optical Fiber Communications:Principles and Practice**. 3. ed. Edinburgh Gate, Harlow, Essex, England: Pearson Education, 2009.

URICK, V. J.; SWINGEN, L.; ROGGE, M. S.; CAMPILLO, A. L.; BUCHOLTZ, F.; DEXTER, J. L. **Design and Characterization of Long-Haul Single-Channel Intensity-Modulated Analog Fiber-Optic Links**. Washington, DC, United States of America, 2005.

VERGARA, S. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 15. ed. São Paulo: Atlas, 2014.