

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

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
GUERRA ELETRÔNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RADOMES EM MEIOS NAVAIS: UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE MATERIAIS E  
DESEMPENHO**



**Primeiro-Tenente Matheus Felipe Amorim de Araújo**

**Rio de Janeiro  
2023**

Primeiro-Tenente Matheus Felipe Amorim de Araújo

RADOMES EM MEIOS NAVAIS: UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE MATERIAIS E  
DESEMPENHO

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

Orientadores:

Dr. Roberto da Costa Lima

Dr<sup>a</sup>. Marta Pudwell Chaves de Almeida

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

Primeiro-Tenente Matheus Felipe Amorim de Araújo

RADOMES EM MEIOS NAVAIS: UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE MATERIAIS E  
DESEMPENHO

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

Aprovada em 24/11/2023

Banca Examinadora:

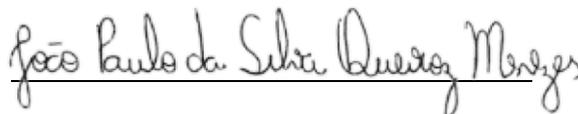
Roberto da Costa Lima, DSc – IPqM



Marta Pudwell Chaves de Almeida, DSc – PUC



João Paulo da Silva Queiroz Menezes, DSc – IPqM



Dedico este trabalho à minha amada filha Maitê. Que sua jornada na vida seja iluminada por sabedoria, amor e conquistas. Cada página deste trabalho reflete meu desejo de proporcionar um futuro melhor para você, e sua presença é minha maior inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Nos agradecimentos deste Trabalho de Conclusão de Curso, é com profundo apreço que reconheço e agradeço a todas as pessoas que desempenharam papéis muito importantes na concretização deste estudo. O apoio, orientação e estímulo que recebi ao longo deste processo foram fundamentais para alcançar esse marco acadêmico. Este espaço é dedicado a expressar minha sincera gratidão a todos que generosamente compartilharam seu conhecimento, ofereceram palavras de encorajamento e estenderam a mão amiga ao longo deste percurso.

Aos meus queridos pais e familiares, cujo amor e apoio inabalável foram fundamentais para que eu pudesse obter sucesso no curso e concluir este trabalho. Vocês são minha fonte de inspiração e força em todos os momentos.

Aos meus amigos do curso de Guerra Eletrônica, Benecase, Leonardo Cordeiro e Thales Maia, que estiveram ao meu lado durante toda a caminhada acadêmica, compartilhando conhecimentos, experiências e desafios. A troca de ideias e o trabalho em equipe foram essenciais para o crescimento mútuo. Aos meus amigos de infância, Bruno Costa, Thiago Pelluso e Vinícius Machado, que conhecem toda a minha história e acompanharam meus passos nos momentos de notícias e desabafos. A presença constante de vocês sempre trouxe alegria e conforto, mesmo nos momentos mais desafiadores. Aos meus irmãos que conheci na Marinha do Brasil, Jonas, Felipe dos Anjos, Felipe Bitencourt, Patuelli, Esquitino e Renan Pereira, com quem compartilhei experiências únicas e momentos memoráveis. O apoio e o companheirismo de vocês foram fundamentais para me manter motivado.

Quero estender meu mais profundo agradecimento à minha querida namorada, Millena Marçal. Seu apoio incondicional e amor constante foram a base fundamental para que eu pudesse completar este trabalho. Além disso, quero reconhecer sua dedicação exemplar como mãe de nossa adorável filha, Maitê. Sua habilidade notável em equilibrar suas responsabilidades como mãe com o suporte incansável que me deu ao longo deste processo é verdadeiramente admirável. Millena, você é a minha maior fortaleza, e sou imensamente grato por tê-la ao meu lado em cada etapa deste desafio.

Ao professor Roberto da Costa Lima, orientador deste trabalho, que compartilhou seus conhecimentos e orientou o desenvolvimento. Suas contribuições foram de valor inestimável para o aprimoramento deste estudo.

Primeiro-Tenente Matheus Felipe Amorim de Araújo.

## **Resumo**

Este Trabalho abordou, de maneira minuciosa, a importância dos radomes na proteção de antenas em ambientes navais. Por meio de uma revisão bibliográfica ampla, foram discutidas as características fundamentais dos materiais dielétricos e seu impacto direto no desempenho das antenas, especialmente na banda X. A pesquisa exploratória permitiu a análise detalhada dos diversos tipos de radomes e como eles influenciam na transparência eletromagnética e na minimização de perdas de sinal em ambientes marítimos desafiadores. A realização de simulações por meio do software Ansys® HFSS™ desempenhou um papel fundamental, fornecendo dados precisos e relevantes que contribuíram de forma significativa para a compreensão e solução de problemas relacionados à proteção de antenas em ambientes navais. Dentre os materiais simulados, apontou o teflon como mais indicado, em termos de características eletromagnéticas, pois apresentou maior transparência eletromagnética. O trabalho resultou em uma contribuição valiosa para a área, trazendo clareza e acuidade substanciais para a temática em questão.

**Palavras- chave:** Radome, Materiais dielétricos, Antenas e Transparência Eletromagnética.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Antena de radar encapsulada em radome na parte frontal de uma aeronave americana.....	16
Figura 2.2 – Polarização de um átomo ou molécula dielétrica.....	19
Figura 2.3 – Polarização de uma molécula polar. ....	20
Figura 2.4 – Padrão de irradiação de uma antena com radome. ....	25
Figura 2.5 – Radome Esférico. ....	29
Figura 2.6 – Radome Cilíndrico. ....	30
Figura 2.7 – Radome do MAGE Defensor MK3.....	31
Figura 2.8 – Radome Inflável. ....	33
Figura 2.9 – Sandwich Radome.....	34
Figura 2.10 – Radome Metálico. ....	35
Figura 2.11 – DSF Radome. ....	37
Figura 2.12 – <i>Concelead Radome</i> . ....	41
Figura 2.13 – Maquete do MAGE Defensor MK3.....	48
Figura 3.1: Tela de entrada do Ansys HFSS. ....	55
Figura 3.2: Tela da Simulação no software Ansys HFSS.....	57
Figura 3.3 – Código de análise dos resultados. ....	58
Figura 4.1 – Layout de Simulação do guia de ondas WR-90.....	60
Figura 4.2 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética no espaço livre. ....	62
Figura 4.3 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética da Alumina.....	63
Figura 4.4 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética do TC250. ....	64
Figura 4.5 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética do Acrílico. ....	65
Figura 4.6 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética do Teflon.....	66

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tabela de Materiais Orgânicos. ....	43
Tabela 2 – Tabela de Materiais Inorgânicos.....	44

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Apresentação do Problema.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Justificativa e Relevância.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>12</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	13
1.3.2 Objetivos Específicos .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Breve histórico sobre Radomes .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Propagação Eletromagnética através de Materiais Dielétricos.....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Tangente de perdas .....	21
<b>2.3 Interação entre Antenas e Radomes .....</b>	<b>22</b>
2.3.1 Boresight error (BSE) e Boresight error slope (BSES) .....	23
2.3.2 Erro de registro .....	24
2.3.3 Lóbulos Laterais .....	24
2.3.4 Despolarização.....	26
2.3.5 Onda Estacionária de Tensão da Antena (VSWR).....	27
2.3.6 Erro de Inserção ( <i>Insertion Loss</i> ) .....	27
<b>2.4 Principais tipos de Radomes.....</b>	<b>28</b>
2.4.1 <i>Solid laminate Radome</i> (Radome Monolítico) .....	31
2.4.2 Radomes Infláveis .....	32
2.4.3 Radomes tipo Sanduíche ( <i>Sandwich Radomes</i> ).....	34
2.4.4 Radomes de estrutura metálica .....	35
2.4.5 Radomes de estrutura dielétrica.....	36
<b>2.5 Avanço na tecnologia dos Radomes .....</b>	<b>37</b>
2.5.1 Uso de Metamateriais .....	38

2.5.2 Radomes Seletivos de Frequência .....	39
2.5.3 <i>Concealed Radomes</i> .....	40
<b>2.6 Materiais Dielétricos para Radomes.....</b>	<b>42</b>
2.6.1 Materiais Orgânicos.....	42
2.6.2 Materiais Inorgânicos .....	43
<b>2.7 Influência das intempéries no meio marítimo.....</b>	<b>45</b>
<b>2.8 Radomes em meios navais.....</b>	<b>46</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Classificação da Pesquisa.....</b>	<b>50</b>
3.1.1 Quanto aos fins .....	51
3.1.2 Quanto aos meios .....	51
<b>3.2 Limitações do Método .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3 Universo e Amostragem .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4 Coleta e Tratamento de Dados .....</b>	<b>54</b>
<b>3.5 Métodos de Linha de Transmissão .....</b>	<b>56</b>
<b>3.6 Uso de MatLab na Análise de Dados .....</b>	<b>58</b>
<b>4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Simulação Eletromagnética Tridimensional.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2 Análise da transparência dos materiais na banda X.....</b>	<b>61</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1 Considerações Finais .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Radomes são estruturas que protegem antenas e equipamentos eletrônicos de sistemas de comunicação, radar e navegação contra os efeitos do ambiente externo. Eles são feitos de materiais dielétricos que permitem que as ondas de rádio, micro-ondas e outras frequências de rádio passem através deles sem perda significativa de energia ou distorção do sinal (SKOLNIK, 2008).

Os radomes podem ter diferentes formas e tamanhos, dependendo da aplicação específica para a qual são projetados. Podem ser construídos em forma de cúpula, cilindro, esfera ou até mesmo de formato personalizado, conforme necessário para a aplicação específica. Eles são comumente utilizados em navios para proteger as antenas dos sistemas de comunicação e navegação, bem como em estações de radar e antenas de telecomunicações (KOZAKOFF, 2009).

Os materiais usados na construção dos radomes devem ser dielétricos e transparentes às frequências que serão transmitidas e recebidas pelas antenas. Eles também devem ser resistentes a condições climáticas adversas, tais como ventos fortes, granizo, chuva e calor extremo. Os materiais comuns usados na construção incluem vidro, fibra de vidro, kevlar, resinas epóxi e compostos de poliéster (CADY; KARELITZ; TURNER, 1948).

Materiais dielétricos são substâncias que não conduzem eletricidade facilmente, agindo como isolantes elétricos. Eles possuem uma capacidade dielétrica, que é a medida de quanto um material pode armazenar energia em um campo elétrico sem conduzi-la. Materiais dielétricos são amplamente utilizados em aplicações eletrônicas, devido à sua capacidade de isolar eletricamente os componentes enquanto interagem com campos elétricos (SHAVIT, 2018).

Os radomes são uma parte importante dos sistemas de comunicação, radar e navegação, pois protegem os componentes eletrônicos contra as condições climáticas adversas, permitindo que os sinais sejam transmitidos e recebidos de forma eficaz e sem interferências.

## 1.1 Apresentação do Problema

A crescente dependência de sistemas de comunicação, navegação e detecção radar em ambientes marítimos tem desencadeado uma necessidade urgente de garantir a eficácia operacional contínua desses sistemas. No entanto, a exposição direta das antenas e sistemas eletrônicos a condições ambientais extremas, como ação da água salgada, ventos vigorosos e radiação solar, pode comprometer a integridade e a confiabilidade desses equipamentos.

As antenas radar, que desempenham um papel central em aplicações navais, estão constantemente expostas às condições adversas do ambiente marítimo. A degradação das antenas e a interferência eletromagnética resultante podem reduzir significativamente a eficácia dos sistemas de detecção, comunicação e navegação. Esses desafios não apenas prejudicam a segurança marítima, mas também impactam a eficiência operacional e aumentam os custos de manutenção.

Nesse cenário, os radomes surgem como uma solução essencial para enfrentar esses desafios complexos. São estruturas projetadas para encapsular e proteger as antenas e sistemas eletrônicos, sendo assim desempenham um papel vital na manutenção da funcionalidade e confiabilidade dos sistemas de radar em meio naval. Entretanto, a escolha do material dielétrico adequado para a construção dessas estruturas é uma questão crítica que envolve considerações de transparência eletromagnética, isolamento elétrico, durabilidade e compatibilidade com as frequências de operação.

Este estudo visa aprofundar a compreensão sobre a importância dos radomes como proteção para antenas radar em meios navais, concentrando-se particularmente nos materiais dielétricos utilizados. O objetivo é explorar os desafios associados à escolha, e à aplicação desses materiais, a fim de maximizar o desempenho das antenas e sistemas eletrônicos em ambientes marítimos adversos. Ao identificar as questões fundamentais relacionadas aos materiais dielétricos em radomes, busca-se fornecer uma base sólida para aprimorar a eficácia operacional, a segurança e a confiabilidade dos sistemas de radar em contextos navais.

## **1.2 Justificativa e Relevância**

A Marinha do Brasil desempenha um papel vital na defesa e segurança do vasto litoral e zonas marítimas, bem como na proteção dos recursos marinhos e na manutenção das rotas de comércio marítimo. Nesse contexto, os sistemas de comunicação, navegação e detecção radar são essenciais para a eficácia das operações navais, desde a vigilância costeira até as atividades de defesa e proteção de interesses nacionais.

A exposição contínua das antenas e sistemas eletrônicos a ambientes marítimos hostis representa um desafio significativo para a Marinha do Brasil. A corrosão causada pela água salgada, a ação dos ventos, a radiação solar e outras condições adversas podem resultar em degradação precoce dos equipamentos, perda de eficácia operacional e aumento dos custos de manutenção.

Nesse cenário, o emprego de radomes como proteção para antenas radar surge como uma solução crítica. No entanto, a seleção e aplicação de materiais dielétricos adequados para a construção dessas estruturas exigem uma abordagem criteriosa. A escolha incorreta dos materiais dielétricos pode comprometer a eficácia das antenas, afetar a qualidade dos sinais e, conseqüentemente, comprometer a operacionalidade das embarcações navais.

A relevância deste estudo reside na necessidade de entender a importância dos radomes como elementos-chave para a preservação da confiabilidade operacional das antenas radar em meio naval. Além disso, considerando o foco da Marinha do Brasil na otimização de recursos e na capacidade de resposta rápida, explorar os aspectos relacionados aos materiais dielétricos em radomes pode resultar em uma maior eficiência operacional e redução de custos de manutenção.

Portanto, este trabalho visa não apenas contribuir para o conhecimento científico sobre o assunto, mas também atender às necessidades específicas da Marinha do Brasil. Ao compreender melhor a importância da escolha dos materiais dielétricos em radomes e sua influência nos sistemas de radar navais, espera-se que este estudo forneça informações valiosas para a tomada de decisões informadas, promovendo a eficácia, a segurança e a prontidão das operações navais no país.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo desta monografia é investigar e analisar a importância e o impacto dos radomes como elementos de proteção para antenas radar em meios navais. O estudo tem como meta compreender os desafios enfrentados em ambientes marítimos, as características essenciais dos radomes para garantir o desempenho das antenas e como essas estruturas contribuem para a eficácia operacional, a segurança marítima e a integridade das comunicações e detecções navais.

Além disso, realizar simulações computacionais de radomes para analisar seu desempenho em sistemas de comunicação e radares em meios navais, considerando diferentes materiais dielétricos. O objetivo é avaliar como diferentes materiais afetam a transparência e o desempenho de antenas em frequências específicas, ampliando o entendimento sobre a influência dos radomes em sistemas de comunicação e radares em meios navais.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como propósito explorar a ampla gama de tópicos relacionados aos radomes, focalizando particularmente na sua aplicação no contexto marítimo. Em um primeiro momento, será traçado um panorama histórico que abrange o surgimento de diversos dispositivos que fazem uso do espectro eletromagnético. O objetivo é identificar o momento em que a necessidade de salvaguardar radares e transmissores contra elementos externos se tornou evidente para os operadores.

Explorando ainda o arcabouço teórico, será estudado os desafios inerentes ao cenário marítimo que podem causar danos aos equipamentos expostos ao ambiente. A intenção é estabelecer uma base justificativa sólida para a adoção de revestimentos protetores que blindem as antenas contra intempéries e exposição constante.

À medida que a monografia se desenvolve, será abordado as diversas facetas do *design* de radomes, incluindo considerações sobre os tipos de materiais e geometria de construção empregados. Essa exploração permitirá uma compreensão mais profunda dos estudos mais recentes sobre o tema.

Em seguida, o foco será a Marinha do Brasil. A utilização contínua de sensores em operações navais os expõe de maneira constante as intempéries climáticas, tornando-se imperativo o uso de proteções para suas antenas. A implementação desses mecanismos protetores pode significativamente reduzir os custos de manutenção desses equipamentos. Assim, o objetivo central deste estudo reside em aumentar a consciência e difundir informações sobre os radomes entre os membros das instituições militares.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho se propõe a atingir os seguintes objetivos específicos, delineando uma estrutura direcionada para compreender e aplicar eficazmente o conceito de radomes como proteção para antenas radar em cenários marítimos.

A primeira etapa visa traçar um panorama histórico abrangendo a evolução dos radomes em paralelo com o desenvolvimento de dispositivos que operam no espectro eletromagnético. Isso permitirá um entendimento mais profundo sobre quando e por que surgiu a necessidade de salvaguardar antenas radar em ambientes marítimos desafiadores.

Em seguida, uma análise aprofundada das características de projeto de radomes constitui a próxima fase do estudo. Isso abrange a exploração das diferentes abordagens na

concepção, considerando aspectos como a seleção criteriosa de materiais dielétricos e a influência da geometria de construção. Esta análise permitirá compreender como podem assegurar a proteção necessária, enquanto mantêm a funcionalidade das antenas.

Ademais, este estudo se dedica a analisar os desafios do ambiente marítimo, explorando as complexidades enfrentadas pelas antenas e sistemas eletrônicos quando expostos às condições adversas do mar. Aspectos como corrosão causada pela água salgada, efeitos dos ventos, umidade constante e a influência da radiação solar serão discutidos, evidenciando como tais fatores são importantes na concepção desses equipamentos.

Uma vez estabelecida a base teórica, o foco se volta para explorar estudos recentes que abordam a implementação de radomes em ambientes navais. Esta seção visa identificar avanços tecnológicos e inovações que estão moldando a área, realçando como essas pesquisas recentes estão contribuindo para o aprimoramento da eficácia operacional em meio marítimo.

Com uma visão consolidada, o estudo assume uma perspectiva mais específica ao aplicar os conceitos à Marinha do Brasil. A utilização constante de sensores e equipamentos expostos às condições marítimas ressalta a importância de adotar radomes como mecanismos protetores. A implementação adequada dessas estruturas não apenas pode otimizar a eficiência operacional, mas também contribuir para a redução dos custos de manutenção.

Além dos objetivos previamente mencionados, este trabalho busca realizar simulações computacionais detalhadas de radomes utilizando software de simulação eletromagnética, como o Ansys® HFSS™. As simulações visam analisar o comportamento dos radomes em relação à passagem e reflexão de ondas eletromagnéticas, considerando diferentes materiais dielétricos. O objetivo é avaliar como diferentes materiais afetam a transparência e o desempenho de antenas em frequências específicas, ampliando o entendimento sobre a influência dos radomes em sistemas de comunicação e radares em meios navais. As simulações fornecerão resultados valiosos para a otimização de projetos de radomes em futuras aplicações.

Finalmente, este trabalho se propõe a promover a conscientização e a disseminação de informações sobre os benefícios dos radomes entre os profissionais da Marinha do Brasil. Através da apresentação de resultados concretos e relevantes, o objetivo é demonstrar de maneira prática como a incorporação deles pode resultar em melhorias tangíveis nas operações navais e na capacidade de enfrentar os desafios marítimos com maior eficácia.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O aprimoramento de plataformas militares, visando cumprir as exigências crescentes das missões contemporâneas, tem desencadeado evoluções constantes no projeto de seus componentes e estruturas, incluindo os radomes. A concepção desta proteção constitui um desafio singular devido à interdependência frequentemente conflitante de seus parâmetros de desempenho, o que requer uma abordagem iterativa até que todos os fatores conflitantes alcancem uma harmonização ideal. Essa etapa do processo de projeto essencialmente representa um equilíbrio entre a transparência eletromagnética, que assegura a passagem eficaz de sinais eletromagnéticos, e a resistência mecânica, fundamental para salvaguardar o conteúdo interno (SKOLNIK, 2008).

A complexidade subjacente à concepção de radomes é acentuada pela variedade de escolhas disponíveis em termos de materiais dielétricos, cada um dotado de características intrínsecas específicas. Essas características englobam propriedades elétricas, mecânicas e de resistência a condições ambientais, além de considerações relacionadas a custos. A seleção do material dielétrico apropriado desempenha um papel crítico, pois influencia diretamente a capacidade de alcançar desempenho ótimo em termos de transparência e resistência (SHAVIT, 2018).

Paralelamente às considerações de desempenho, o projeto de radomes requer uma avaliação detalhada sob a perspectiva da fabricação. Garantir que o projeto possa ser produzido eficazmente em larga escala, preservando simultaneamente suas propriedades elétricas e mecânicas, é uma questão de importância evidente para a aplicação prática dessas estruturas em contextos militares.

Nesse contexto complexo, a pesquisa e o desenvolvimento têm sido vitais para aprimorar a concepção desta estrutura, tornando-a mais eficaz em ambientes militares desafiadores. Isso inclui uma compreensão aprofundada das características dos materiais dielétricos, a aplicação de técnicas avançadas de modelagem e simulação, bem como a consideração das demandas específicas de cada aplicação.

Esta seção procura oferecer uma base sólida para a compreensão das complexidades e dos desafios inerentes à concepção de radomes no contexto naval. Com base nessa fundação, a pesquisa subsequente explorará os avanços mais recentes, as melhores práticas e as inovações tecnológicas que estão moldando o campo e influenciando o projeto, alinhando-se às necessidades das operações militares modernas e complementando o histórico de desenvolvimento dessas estruturas.

## 2.1 Breve histórico sobre Radomes

A história dos radomes está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento das tecnologias de radar e comunicação ao longo do século XX. Essas estruturas, essencialmente invólucros que abrigam antenas e dispositivos eletrônicos, surgiram como resposta à necessidade de proteger esses equipamentos das intempéries e do ambiente hostil em que operavam (CADY, KARELITZ e TURNER, 1948).

Durante a Segunda Guerra Mundial, o radar desempenhou um papel importante na detecção de aeronaves inimigas. No entanto, os primeiros sistemas de radar eram vulneráveis aos elementos naturais e interferências externas. Para resolver esse problema, engenheiros começaram a construir estruturas protetoras ao redor das antenas de radar. Essas estruturas precursoras dos radomes eram frequentemente improvisadas, feitas de materiais simples como madeira compensada, mas representaram um ponto de partida importante.

Desde a Segunda Guerra Mundial, os materiais de radomes continuaram a se desenvolver em duas áreas principais: cerâmicas, principalmente para radomes de mísseis de alta velocidade, e materiais orgânicos de alta resistência para radomes em forma de sanduíche. Atualmente, os radomes mais modernos em aeronaves empregam construção de parede em forma de sanduíche, como mostrado na Figura 2.1 no nariz de uma aeronave, exemplificando a constante evolução e adaptação dessas estruturas essenciais na tecnologia de radar e comunicação, tanto em aplicações militares quanto civis (SHAVIT, 2018).

Figura 2.1 – Antena de radar encapsulada em radome na parte frontal de uma aeronave americana.



Fonte: (SHAVIT, 2018).

À medida que as tecnologias de radar e comunicação evoluíram após a guerra, também o fizeram os radomes. Os materiais de construção foram aprimorados, com a fibra de vidro reforçada com plástico se tornando uma escolha comum devido à sua durabilidade e capacidade de permitir a passagem de sinais de radar. Essas melhorias permitiram que fossem utilizados não apenas em aplicações militares, mas também em setores civis, como aviação e telecomunicações (SHAVIT, 2018).

As décadas seguintes testemunharam inovações tecnológicas contínuas. Eles se tornaram mais aerodinâmicos, capazes de suportar condições climáticas extremas e projetados para manter a transparência de sinais de radar e comunicação. Além disso, a crescente demanda por comunicações via satélite expandiu ainda mais as aplicações dos radomes.

Hoje, eles desempenham um papel crítico em uma ampla variedade de contextos, incluindo defesa, aviação civil, rastreamento de clima, telecomunicações via satélite e muito mais. Sua evolução constante reflete não apenas a necessidade de proteger antenas e equipamentos eletrônicos em ambientes adversos, mas também a capacidade da engenharia e da tecnologia de se adaptar e se aprimorar ao longo do tempo.

## **2.2 Propagação Eletromagnética através de Materiais Dielétricos**

A propagação eletromagnética é um fenômeno essencial que permeia o mundo moderno, desempenhando um papel fundamental em diversas tecnologias e aplicações. No cerne desse fenômeno, encontramos os materiais dielétricos, que desempenham um papel de destaque na manipulação e na transmissão de sinais eletromagnéticos. Nesta seção, será explorado os fundamentos da propagação eletromagnética através de materiais dielétricos, examinando suas propriedades intrínsecas, características de propagação e aplicações práticas.

Os materiais dielétricos são uma classe de materiais que, em oposição aos condutores, não permitem a livre passagem de corrente elétrica, mas têm a capacidade de armazenar energia elétrica em seu campo elétrico. Essa capacidade de armazenamento é intrinsecamente ligada às características microscópicas dos materiais dielétricos, incluindo sua polarização molecular e sua resposta a campos elétricos externos.

Em um nível microscópico, os átomos e moléculas em um material dielétrico podem ser polarizados em resposta a um campo elétrico externo. Isso resulta na formação de dipolos elétricos temporários, que se alinham na direção do campo elétrico aplicado (SADIKU, 2004). Essa polarização é reversível e segue a direção e a intensidade do campo elétrico.

Duas propriedades-chave dos materiais dielétricos são a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e a constante dielétrica ( $\kappa$ ), que descrevem a capacidade de um material de afetar a intensidade de um campo elétrico aplicado. A permissividade dielétrica é uma medida da capacidade de um material de armazenar energia elétrica em seu campo elétrico, enquanto a constante dielétrica é a relação entre a permissividade de um material e a permissividade do vácuo ( $\epsilon_0$ ) (HALLIDAY, 2016).

Quando um campo elétrico é aplicado a um material dielétrico, ocorrem mudanças significativas na distribuição de cargas elétricas dentro do material. Essas mudanças são essenciais para entender a densidade de fluxo elétrico ( $D$ ) nesse contexto. A densidade de fluxo elétrico é uma medida da quantidade de carga elétrica que atravessa uma unidade de área em um material dielétrico sob a influência de um campo elétrico (SADIKU, 2004).

A densidade de fluxo elétrico ( $D$ ) é diretamente proporcional ao campo elétrico ( $E$ ) aplicado e à permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) do material dielétrico. A permissividade elétrica é uma característica fundamental dos materiais dielétricos que descreve sua capacidade de responder a campos elétricos externos. Ela é representada pela constante “ $\epsilon$ ” e pode ser dividida em duas componentes: “ $\epsilon_0$ ”, a permissividade elétrica do vácuo, e “ $\epsilon_r$ ”, a permissividade relativa do material dielétrico.

A fórmula que descreve a densidade de fluxo elétrico ( $D$ ) em termos do campo elétrico ( $E$ ) e da permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) é a seguinte:

$$D = \epsilon E \quad (1)$$

- $D$  é a densidade de fluxo elétrico (Coulombs por metro quadrado,  $C/m^2$ ).
- $\epsilon$  é a permissividade elétrica do material dielétrico (Farads por metro,  $F/m$ ).
- $E$  é o campo elétrico aplicado (Volts por metro,  $V/m$ ).

Esta equação expressa a relação direta entre o campo elétrico aplicado e a densidade de fluxo elétrico resultante em um material dielétrico. Quanto maior for a permissividade elétrica do material ( $\epsilon$ ), maior será a densidade de fluxo elétrico ( $D$ ) para um campo elétrico dado ( $E$ ).

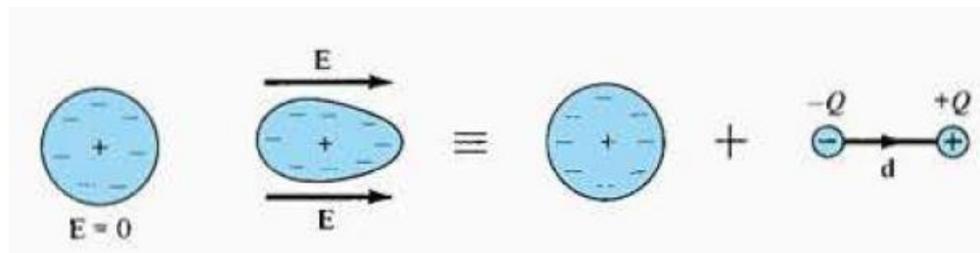
Além disso, vale destacar que a permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) de um material dielétrico em relação à do vácuo ( $\epsilon_0$ ) pode ser expressa como  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ . Isso significa que a permissividade relativa reflete como o material dielétrico se compara ao vácuo em termos de sua capacidade de resposta a campos elétricos.

Em resumo, a densidade de fluxo elétrico em um material dielétrico é determinada pelo campo elétrico aplicado e pela permissividade elétrica do material. A permissividade

elétrica desempenha uma função essencial na capacidade do material de responder a campos elétricos, e sua influência direta é refletida na relação proporcional entre “D”, “E” e “ $\epsilon$ ” na fórmula apresentada.

A polarização ocorre quando os átomos ou moléculas dentro de um material dielétrico são temporariamente deslocados ou alinhados quando um campo elétrico é aplicado. Esse alinhamento cria uma distribuição de cargas elétricas dentro do material, gerando um campo elétrico secundário que se opõe ao campo elétrico incidente. Como resultado, o material dielétrico retarda a propagação da onda eletromagnética, mas não a absorve. A figura 2.2 mostra de forma ilustrativa esse fenômeno.

Figura 2.2 – Polarização de um átomo ou molécula dielétrica.



Fonte: (SADIKU, 2004).

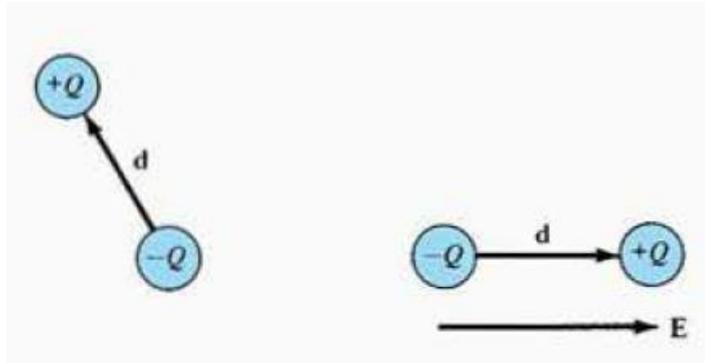
Para entender o impacto um campo elétrico em um material dielétrico, considere um átomo em um dielétrico como composto por duas partes: uma carga negativa  $-Q$  (representando a nuvem eletrônica) e uma carga positiva  $+Q$  (representando o núcleo), conforme ilustrado na Figura 2.2. Um raciocínio semelhante pode ser aplicado a uma molécula dielétrica. Deve-se tratar os núcleos nas moléculas como pontos de carga concentrada e a estrutura eletrônica como uma única distribuição de cargas negativas. Como a quantidade de cargas negativas é igual à quantidade de cargas positivas, o átomo como um todo, ou a molécula, permanece eletricamente neutro (SADIKU, 2004).

Portanto, conclui-se que o principal efeito de um campo elétrico em um material dielétrico é induzir a formação de momentos de dipolo que se alinham na direção do campo. Esses materiais dielétricos são conhecidos como apolares.

Exemplos de tais dielétricos incluem o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio e os gases nobres. Nas moléculas dos dielétricos apolares, não existem dipolos permanentes a menos que um campo elétrico seja aplicado, como mencionado anteriormente. Por outro lado, existem outros tipos de moléculas, como as da água, do dióxido de enxofre e do ácido clorídrico, que possuem dipolos permanentes internos, orientados aleatoriamente, como ilustrado na Figura 2.3, e são denominadas moléculas polares. Quando um campo elétrico é aplicado a uma

molécula polar, o dipolo permanente experimenta um torque que tende a alinhar o momento de dipolo na mesma direção do campo  $E$ , conforme demonstrado na Figura 2.3 (SADIKU, 2004).

Figura 2.3 – Polarização de uma molécula polar.



Fonte: (SADIKU, 2004).

A capacidade dos materiais dielétricos de polarizar em resposta a um campo elétrico permite que eles sejam transparentes à energia eletromagnética. A polarização molecular temporária não resulta em absorção significativa da energia da onda eletromagnética, nem em reflexão significativa. Em vez disso, a onda continua a se propagar através do material, com apenas um leve atraso de fase devido à polarização.

Os materiais dielétricos desempenham um papel importante em várias aplicações tecnológicas. Um exemplo notável é a utilização de dielétricos em capacitores, que armazenam e liberam energia elétrica em circuitos elétricos. Além disso, esses materiais são essenciais na fabricação de componentes eletrônicos, como microchips e circuitos integrados.

Isso também é particularmente importante em sistemas de radar e comunicação, onde a precisão e a integridade dos sinais são essenciais. Qualquer perda significativa de energia da onda ou distorção dos sinais de radar pode prejudicar a eficácia do sistema. Portanto, a escolha criteriosa de materiais dielétricos que sejam transparentes às frequências relevantes é essencial para garantir que o radome proteja as antenas sem comprometer a qualidade das transmissões e recepções de radar.

A escolha cuidadosa dos materiais dielétricos é fundamental para garantir que o radome não afete negativamente o desempenho do sistema de radar ou comunicação. Materiais dielétricos adequados são transparentes às frequências específicas usadas pelos sistemas, permitindo que eles funcionem sem distorção ou atenuação significativa dos sinais.

### 2.2.1 Tangente de perdas

A tangente de perdas é uma medida que descreve a perda de energia em um material dielétrico quando a radiação eletromagnética o atravessa. Essa perda de energia é devida à conversão da energia eletromagnética em energia térmica à medida que a radiação interage com o material dielétrico.

A tangente de perdas é expressa pela fórmula:

$$\tan \theta = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \quad (2)$$

A fórmula acima é uma equação que descreve a tangente do ângulo de perdas ( $\Theta$ ) em um meio quando uma onda eletromagnética o atravessa. Será analisado cada um dos elementos gregos na fórmula abaixo:

- "tan  $\theta$ " (tangente de perdas): A tangente de perdas é uma medida que quantifica a absorção de energia por um meio quando uma onda eletromagnética o atravessa. Ela fornece informações sobre como as ondas eletromagnéticas são atenuadas (perdem energia) no meio;
- " $\sigma$ " (sigma, condutividade elétrica): A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é uma propriedade do material que descreve sua capacidade de conduzir eletricidade. Materiais com alta condutividade elétrica permitem a passagem de corrente elétrica mais facilmente, o que geralmente está associado a uma maior absorção de energia por ondas eletromagnéticas. Um meio é considerado um bom condutor quando a condutividade ( $\sigma$ ) é muito alta, e isso leva a uma maior absorção de energia e uma "tg  $\Theta$ " significativamente grande;
- " $\omega$ " (ômega, frequência angular): A frequência angular ( $\omega$ ) representa a frequência da onda eletromagnética em radianos por segundo. Ela está relacionada à frequência em hertz (Hz) e descreve quantos ciclos completos da onda ocorrem em um segundo; e
- " $\varepsilon$ " (épsilon, permissividade elétrica): A permissividade elétrica ( $\varepsilon$ ) é uma medida que descreve a capacidade de um material para armazenar energia elétrica quando sujeito a um campo elétrico. Materiais com alta permissividade elétrica têm a capacidade de armazenar mais energia elétrica. Um meio é considerado dielétrico quando a permissividade ( $\varepsilon$ ) é alta e a condutividade ( $\sigma$ ) é muito baixa, resultando em uma "tg  $\Theta$ " muito pequena.

A influência dessas propriedades em ondas eletromagnéticas é significativa. Meios dielétricos, com baixa condutividade e alta permissividade, permitem a propagação eficaz de ondas eletromagnéticas, com perdas mínimas (SADIKU, 2004). No entanto, meios condutores, com alta condutividade, absorvem uma parte significativa da energia da onda eletromagnética, resultando em altas perdas e menor transparência às ondas.

Essa compreensão é muito importante no projeto de radomes, onde a seleção adequada de materiais dielétricos ou condutores pode afetar significativamente o desempenho na transmissão de sinais de radar, comunicação e outras aplicações.

A tangente de perdas é uma medida adimensional, geralmente expressa como um número decimal. Quanto menor for o valor da tangente de perdas, menos energia é perdida no material e, portanto, o material é considerado mais eficiente em termos de transmissão de radiação eletromagnética.

Para materiais usados em radomes, é desejável ter uma tangente de perdas baixa. Isso ocorre porque um material com uma alta tangente de perdas pode absorver uma quantidade significativa de energia da radiação eletromagnética, o que levará a perdas de sinal, atenuação e redução da eficiência do sistema de antena radar.

### **2.3 Interação entre Antenas e Radomes**

Nas últimas décadas, o rápido crescimento no uso do espectro eletromagnético tem impulsionado melhorias significativas no desempenho das antenas associadas a sensores e equipamentos de comunicação eletrônica. Dois exemplos notáveis dessas melhorias são os sistemas de antenas de banda larga de dupla polarização, que aprimoram o desempenho de radares, e as antenas com atenuação de lóbulos laterais, projetadas para serem utilizadas em equipamentos de comunicação por satélite que precisam atender a requisitos rigorosos de lóbulos laterais extremamente reduzidos (KOZAKOFF, 2009).

As antenas que fazem parte desses equipamentos exigem desempenho do radome muito mais rigoroso do que seus predecessores, porque o desempenho da antena pode ser afetado pelos efeitos gerados pela interação entre a antena e seu invólucro protetor, que incluem, mas não se limitam a:

- Introdução de *Boresight error* (BSE) e *Boresight error slope* (BSES);
- Introdução de erro de registro;
- Aumento nos níveis de lóbulos laterais da antena;

- Aumento na despolarização ou no desvio de energia de uma polarização para outra;
- Aumento na relação de onda estacionária de tensão da antena (VSWR); e
- Introdução de *insertion loss* devido à presença do radome (KOZAKOFF, 2009).

Esses avanços tecnológicos na área de antenas e comunicações têm sido impulsionados pela crescente demanda por sistemas de radar mais eficientes e sistemas de comunicação por satélite com desempenho excepcional. No entanto, à medida que as antenas se tornam mais sofisticadas, os radomes que as protegem precisam atender a padrões cada vez mais rigorosos para garantir que o desempenho das antenas não seja afetado adversamente. Isso se deve ao fato de que as características dos radomes, como os efeitos listados acima, podem ter um impacto significativo na integridade e eficácia dos sistemas de radar e comunicação. Portanto, o desenvolvimento de radomes avançados é importante para acompanhar o progresso tecnológico e garantir a qualidade das operações em ambientes cada vez mais complexos e desafiadores (KOZAKOFF, 2009).

### 2.3.1 Boresight error (BSE) e Boresight error slope (BSES)

No contexto de sistemas de antenas e radares, *boresight error* (BSE) e *boresight error slope* (BSES) são termos que se referem a erros relacionados à direção ou orientação da antena em relação ao alvo, ou ponto central pretendido. Esses termos são usados para quantificar desvios na posição da antena em relação à direção ideal, o que pode afetar a precisão e o desempenho do sistema.

O BSE se refere ao erro angular entre a direção em que a antena está realmente apontada e a direção ideal, que é o ponto central ou alvo desejado. É a diferença entre a direção real da antena e a direção para a qual ela deveria estar apontada. É uma medida angular expressa em graus ou outras unidades angulares. Reduzir o BSE é crítico para garantir que a antena aponte com precisão para o alvo (KOZAKOFF, 2009).

Por sua vez, o BSES indica como o erro angular (BSE) varia com base na posição angular da antena. Em vez de ser uma medida fixa de erro angular, quantifica como o erro angular muda à medida que a antena é movida ou varrida em diferentes direções. Essa informação é importante porque algumas antenas podem ter um BSE que varia com o ângulo de apontamento, e o BSES quantifica essa variação. Isso é especialmente crítico em aplicações de radar, onde a precisão na direção de apontamento é essencial (KOZAKOFF, 2009).

Esses erros são considerações essenciais no projeto, calibração e operação de sistemas de antenas e radares, pois afetam diretamente a capacidade do sistema de apontar com precisão e rastrear alvos. Minimizar o *Boresight Error* e entender como o *Boresight Error Slope* varia com a posição angular são aspectos fundamentais para otimizar o desempenho do sistema.

### 2.3.2 Erro de registro

No contexto de sistemas de antenas e comunicações, esse termo é usado para descrever uma situação em que a orientação de componentes em um sistema, como uma antena e seu radome, não está devidamente alinhada conforme o planejado ou necessário. Isso pode ocorrer devido a imprecisões no processo de instalação ou montagem (SHAVIT, 2018).

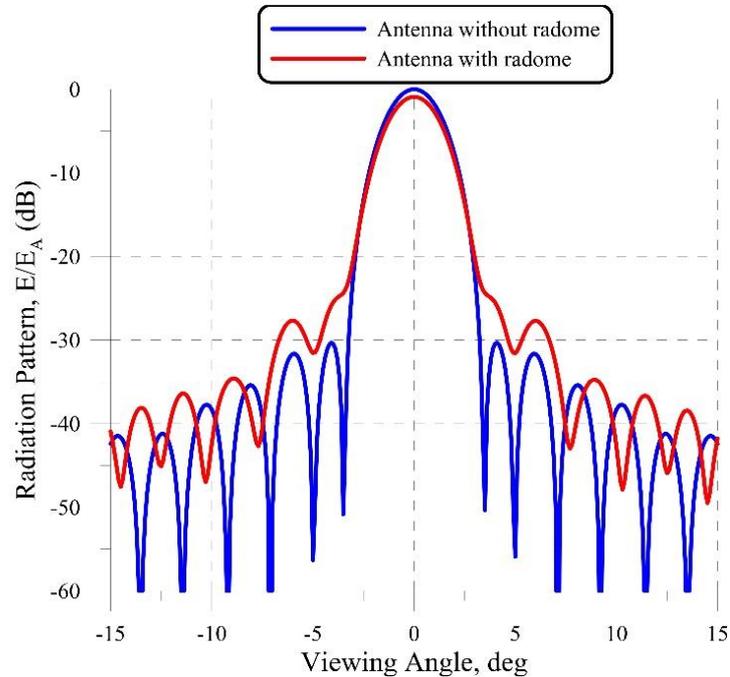
Quando um erro de registro ocorre em um sistema de antena, ele pode ter impactos negativos no desempenho geral. Por exemplo, se a antena não estiver corretamente alinhada com o radome que a protege, isso pode resultar em distorção dos sinais transmitidos ou recebidos. Em casos mais graves, um erro de registro significativo pode levar a problemas como aumento dos lóbulos laterais da antena, maior perda de sinal ou até mesmo danos físicos ao equipamento.

Portanto, minimizar ou corrigir erros de registro é fundamental para garantir que um sistema de antena funcione conforme o esperado e atenda aos requisitos de desempenho. Isso envolve procedimentos cuidadosos de instalação, calibração e alinhamento para garantir que todos os componentes do sistema estejam corretamente posicionados e orientados.

### 2.3.3 Lóbulos Laterais

Os lóbulos laterais, também conhecidos como lóbulos secundários, são componentes indesejados do padrão de radiação de uma antena. Eles são áreas do diagrama de radiação da antena que estão fora do lóbulo principal, que é a direção principal de emissão ou recepção da antena (SKOLNIK, 2008). Em outras palavras, os lóbulos laterais representam direções em que a antena irradia ou capta energia além da direção desejada. A figura 2.4 mostra um gráfico que ilustra o aumento do nível dos lóbulos laterais causado pela presença de um radome.

Figura 2.4 – Padrão de irradiação de uma antena com radome.



Fonte: (BASKOV; POLITIKO; SEMENENKO, 2020).

Quando se trata de radomes, os lóbulos laterais podem ser afetados de várias maneiras. Primeiramente, a introdução de um *Boresight Error* pode ocorrer quando um radome não está perfeitamente alinhado com a antena. Isso pode resultar em uma mudança na direção de apontamento da antena, causando a emissão ou recepção de sinais em direções não desejadas, ou seja, nos lóbulos laterais.

Além disso, distúrbios na propagação de ondas eletromagnéticas podem ocorrer devido à interação do material do radome com as ondas. Isso pode causar distorções nas frentes de onda e na direção do feixe principal da antena, levando a lóbulos laterais indesejados.

As variações na permissividade dielétrica do material do radome também podem causar distorções no campo elétrico, afetando a direção do feixe principal e contribuindo para lóbulos laterais. Além disso, a presença do radome pode causar efeitos de difração, onde as ondas eletromagnéticas doam-se em torno do radome e podem contribuir para a formação de lóbulos laterais no diagrama de radiação.

Em resumo, os lóbulos laterais representam direções indesejadas no padrão de radiação de uma antena, e a presença de um radome mal projetado ou mal instalado pode afetar adversamente o desempenho da antena, contribuindo para esses efeitos indesejados. Portanto,

é importante projetar e calibrar adequadamente os radomes para minimizar esses efeitos e garantir o desempenho ideal do sistema de antena e radar.

#### 2.3.4 Despolarização

A despolarização é um fenômeno que pode afetar o desempenho das antenas quando um radome está presente. Ela se relaciona com a alteração da polarização da onda eletromagnética devido às interações que ocorrem entre o material do radome e as ondas que passam por ele. Para entender melhor esse conceito, é importante compreender o que é a polarização (SHAVIT, 2018).

A polarização de uma onda eletromagnética refere-se à orientação do campo elétrico da onda à medida que ela se propaga pelo espaço. As antenas são projetadas para operar com uma polarização específica, e é fundamental que os sinais transmitidos ou recebidos estejam alinhados com a polarização correta da antena para garantir a máxima eficiência do sistema.

Quando um radome é colocado em volta de uma antena, especialmente se o material possui características dielétricas ou condutivas, ele pode causar distorções na polarização da onda incidente. Isso ocorre porque pode afetar a orientação do campo elétrico da onda, resultando em uma mudança na polarização do sinal à medida que ele atravessa o radome.

Os efeitos da despolarização podem incluir uma redução na eficiência da antena. Quando a polarização do sinal não está alinhada com a polarização da antena, parte da energia do sinal é perdida. Isso pode resultar em uma diminuição na potência do sinal transmitido ou na qualidade do sinal recebido.

Além disso, a despolarização pode levar ao aumento da relação de onda estacionária de tensão (VSWR) da antena. A VSWR é uma medida da correspondência de impedância entre a antena e o sistema de transmissão. Um aumento na VSWR indica uma má correspondência de impedância, o que pode resultar em reflexões de energia de volta para o sistema, causando perda de sinal (SHAVIT, 2018).

Em aplicações onde a polarização é crítica, como em comunicações de micro-ondas ou em radares polarimétricos, a despolarização pode degradar significativamente a qualidade e a precisão das medições. Portanto, é fundamental que os projetistas de sistemas de antenas considerem os efeitos da despolarização ao selecionar, projetar e posicionar radomes.

Minimizar a despolarização envolve a escolha cuidadosa do material do radome e a sua instalação para preservar a polarização adequada dos sinais. Isso é essencial para garantir

que o sistema de antena e radar funcione com eficiência e mantenha a qualidade das comunicações e medições.

### 2.3.5 Onda Estacionária de Tensão da Antena (VSWR)

A sigla "VSWR" significa "*Voltage Standing Wave Ratio*", que em português pode ser traduzida como "Razão de Onda Estacionária de Tensão em Antenas". A VSWR é uma medida que descreve a qualidade de uma transmissão de rádio ou a eficiência de uma antena. Ele é um indicador da quantidade de energia que é refletida de volta para a fonte em comparação com a quantidade de energia transmitida pela antena.

A VSWR é expressa como uma razão ou proporção e é calculado pela divisão da tensão máxima (ou corrente máxima) em um ponto da antena pela tensão mínima (ou corrente mínima) em outro ponto da antena. Um VSWR ideal seria igual a 1, o que indicaria que toda a energia está sendo transmitida pela antena e nada está sendo refletido de volta para a fonte. Quanto maior o VSWR, maior a quantidade de energia refletida e, conseqüentemente, pior a eficiência da antena.

A VSWR é um parâmetro importante na engenharia de antenas e comunicações, pois ajuda a determinar a eficácia da antena em transmitir sinais e receber sinais sem perdas significativas. Um alto VSWR pode indicar problemas, como uma má correspondência de impedância entre a antena e o cabo de alimentação, o que pode levar a perdas de sinal e reflexões prejudiciais. Portanto, manter um VSWR baixo é fundamental para garantir o bom desempenho de sistemas de comunicação e transmissão de rádio.

Certos radomes podem influenciar o desempenho das antenas, incluindo o VSWR. A escolha do material dielétrico, a espessura e *design* do radome, bem como sua transparência e possíveis efeitos de depolarização, são fatores que podem alterar a impedância da antena e, conseqüentemente, o VSWR. Além disso, a calibração e ajuste da antena após a instalação do radome podem ser necessários para manter a performance desejada. Portanto, é necessário considerar o impacto do radome na antena ao projetar e selecioná-los para garantir que o VSWR permaneça dentro dos parâmetros aceitáveis.

### 2.3.6 Erro de Inserção (*Insertion Loss*)

O "*insertion loss*" (perda de inserção) é um conceito relevante a ser considerado quando um radome é utilizado em conjunto com uma antena. Este termo refere-se à diminuição

na intensidade do sinal que ocorre devido à presença do radome durante a passagem da onda eletromagnética por ele. Essa perda é expressa como uma redução na potência do sinal transmitido ou recebido em comparação com o que seria sem o invólucro (KOZAKOFF, 2009).

A perda de inserção é uma preocupação importante no projeto de sistemas de antenas e radares, pois pode ter um impacto direto na qualidade e eficiência das comunicações ou medições. Existem várias razões para o *insertion loss* ocorrer quando um radome é empregado.

Primeiramente, muitos radomes são construídos com materiais dielétricos, com a capacidade de interagir com as ondas eletromagnéticas. Isso resulta em parte da energia do sinal sendo absorvida, o que leva à perda de potência.

Além disso, quando uma onda eletromagnética encontra a interface entre o material do radome e o ambiente externo, ocorrem reflexões e refrações. Parte da energia do sinal é refletida de volta para o ambiente externo, enquanto outra parte é refratada para dentro do radome. Esses fenômenos contribuem para a perda de potência.

O material também pode absorver parte da energia da onda eletromagnética à medida que ela o atravessa. Isso é especialmente notável em frequências específicas em que o material possui características significativas de absorção.

Finalmente, se o radome não estiver perfeitamente adaptado à antena em termos de impedância, isso pode causar reflexões adicionais de energia, contribuindo para a perda de inserção.

Minimizar o *insertion loss* é essencial para garantir que um sistema de antena e radar funcione com máxima eficiência. Isso envolve a seleção cuidadosa do material do radome, bem como o projeto e posicionamento adequados para reduzir a absorção, reflexão e refração de energia. O objetivo é preservar a potência do sinal transmitido ou recebido e manter a qualidade das comunicações ou medições, especialmente em aplicações críticas onde a perda de inserção pode ser prejudicial.

## 2.4 Principais tipos de Radomes

Os principais tipos de radomes serão explorados, destacando suas características distintas, materiais de construção e aplicações típicas. Cada tipo de radome é projetado para atender a requisitos específicos, e compreender suas variações é essencial para a seleção e aplicação adequadas em uma variedade de contextos. Será examinado radomes esféricos,

cilíndricos, planos, de grade e muitos outros, discutindo suas vantagens, desvantagens e casos de uso ideais.

Será explorado as diversas abordagens de projeto em relação à forma dessas estruturas de proteção. Cada forma de radome possui características e aplicações distintas, e compreender suas variações é essencial para selecionar o *design* mais adequado a uma determinada aplicação. A análise abrangente dessas diferentes formas de projeto permitirá identificar as vantagens, desvantagens e cenários ideais de uso de cada uma delas, fornecendo uma base sólida para a escolha criteriosa do radome mais eficaz em sistemas de antenas e comunicações.

A forma de radome desempenha um papel fundamental no desempenho e nas aplicações dessas estruturas de proteção. Primeiramente, os esféricos, cuja forma se assemelha a uma esfera ou domo. Essa geometria é altamente eficaz em garantir uma cobertura uniforme e completa em todas as direções, tornando-os ideais para sistemas de radar, como radares meteorológicos e sistemas de defesa aérea. Sua forma aerodinâmica também os torna resilientes a condições climáticas adversas. A figura 2.5 mostra um radome utilizado em navios de guerra.

Figura 2.5 – Radome Esférico.



Fonte: (KOZAKOFF, 2009).

Os radomes cilíndricos, por outro lado, apresentam uma forma alongada de cilindro e são frequentemente empregados em antenas lineares ou configurações de antenas em forma de haste. Essa geometria é particularmente adequada para aplicações de comunicação via satélite, onde antenas parabólicas são comuns. A forma cilíndrica permite que eles protejam eficazmente as antenas ao longo de seu comprimento. A figura 2.6 mostra um exemplo.

Figura 2.6 – Radome Cilíndrico.



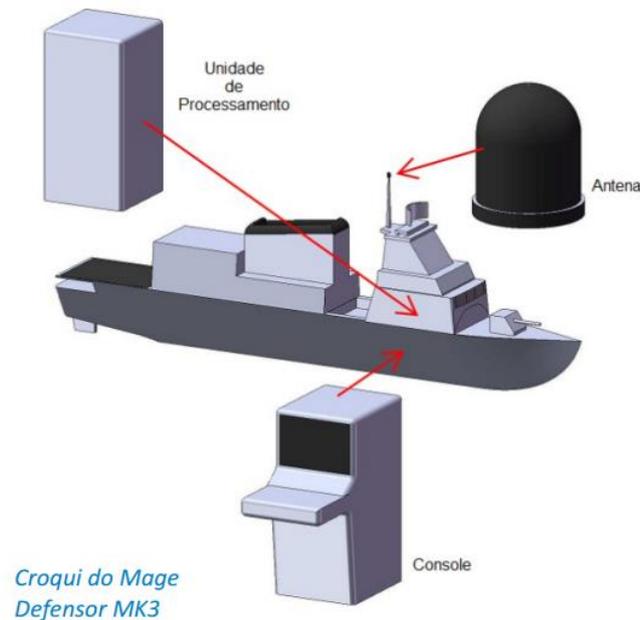
Fonte: Disponível em < <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/07.naval/karte093.pt.html>>.

Já os radomes planos têm uma forma plana ou levemente cônica, sendo ideais para antenas de painel e *phased arrays*. Sua geometria simplificada facilita a integração discreta em estruturas aerodinâmicas, como aeronaves e navios. Esses são frequentemente escolhidos quando a minimização da resistência do vento é crítica.

Os de grade são caracterizados por sua estrutura de malha ou grelha, proporcionando alta transparência à passagem de sinais. Isso os torna ideais para aplicações de comunicação de alta frequência, como rádio, micro-ondas e comunicações por satélite, onde a qualidade do sinal é essencial. Apesar de sua excelente performance elétrica, podem ser menos eficazes na proteção contra elementos externos.

Os radomes de casca de ovo apresentam uma forma que se assemelha à metade de uma casca de ovo, sendo projetados para sistemas de radar de *phased array*. Sua geometria permite uma variação controlada da fase das ondas eletromagnéticas, possibilitando o direcionamento eletrônico preciso dos feixes de radar, sendo usados em aplicações militares e de defesa. A figura 2.7 ilustra esse tipo de geometria utilizada no novo MAGE Defensor MK3 em desenvolvimento para as Fragatas Classe Tamandaré. Este projeto é desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) em parceria com a empresa Omnisys.

Figura 2.7 – Radome do MAGE Defensor MK3.



Fonte: Disponível em < <https://estrategiaglobal.blog.br/2015/02/instituto-de-pesquisas-da-marinha-desenvolve-novo-mage-para-as-corvetas-tamandare.html> >.

Segundo Shavit (2018) existem classificações de radomes quanto ao material e como são projetados. Os principais são: os *Solid Laminate* (Lâminas Sólidas), Infláveis, os *Sandwich Radomes* (Radomes Sanduíche), os de estrutura metálica e estrutura dielétrica.

#### 2.4.1 *Solid laminate Radome* (Radome Monolítico)

Os *solid laminate radomes*, também conhecidos como radomes monolíticos, desempenham uma função essencial em uma variedade de aplicações, desde sistemas de radar até comunicações via satélite. O que os define é sua construção monolítica, que significa que são fabricados a partir de uma única camada contínua de material. Essa característica fundamental os diferencia de seus homólogos compostos por várias camadas de materiais diferentes.

Uma de suas características mais importantes é a transparência eletromagnética. Isso significa que são projetados para permitir que as ondas eletromagnéticas, como sinais de radar, micro-ondas ou comunicações, passem por eles com o mínimo de atenuação ou interferência.

Essa transparência é essencial para garantir que o desempenho dos sistemas não seja prejudicado.

A baixa atenuação de sinal é outra característica importante. Graças à sua construção monolítica, eles geralmente têm uma perda de sinal mínima. Isso é especialmente crítico em aplicações de radar e comunicações, onde qualquer perda de sinal pode afetar negativamente a qualidade das informações transmitidas ou recebidas.

A versatilidade de forma deste tipo de radome é uma vantagem adicional. Embora possam ter formas comuns, como domos ou cilindros, também podem ser personalizados para atender a requisitos específicos de aplicação. Isso oferece flexibilidade na integração com sistemas de antenas de diferentes geometrias.

São geralmente construídos a partir de painéis de fibra de vidro sólida de forma duplamente curva. Para radomes de pequeno porte (com menos de 1 metro de diâmetro), eles são frequentemente feitos de uma única peça. No caso de radomes maiores, eles são compostos por painéis dispostos em fileiras verticais e horizontais, mantendo a construção monolítica (SHAVIT, 2018).

Exibem excelente desempenho abaixo de 3 GHz, ou em frequências mais altas quando a espessura da parede é ajustada para larguras de banda estreitas. Essa capacidade de ajuste da espessura da parede permite um desempenho eficaz em uma ampla gama de frequências, tornando-os versáteis em diversas aplicações (SHAVIT, 2018).

Em resumo, os radomes monolíticos desempenham um papel vital na proteção de sistemas de antenas e comunicações contra condições ambientais adversas, ao mesmo tempo que garantem transparência eficaz para as ondas eletromagnéticas. Sua construção monolítica, durabilidade, baixa atenuação de sinal e capacidade de ajuste de espessura da parede os tornam uma escolha confiável e versátil em uma variedade de aplicações críticas para o desempenho e a segurança.

#### 2.4.2 Radomes Infláveis

Os radomes infláveis representam uma abordagem única e inovadora na proteção de antenas e sistemas de comunicação. Eles são, na verdade, balões esféricos truncados feitos de um tecido resistente que mantém sua forma graças à alta pressurização interna. Embora sejam relativamente incomuns em comparação com outros tipos de radomes, eles apresentam características distintas que os tornam notáveis. Um típico radome inflável é mostrado na figura 2.10 abaixo.

Figura 2.8 – Radome Inflável.



Fonte: (SHAVIT, 2018).

Em termos de desempenho eletromagnético, se destacam. Eles oferecem uma transmissão eficaz de ondas eletromagnéticas em uma ampla faixa de frequências, abrangendo desde baixas até altas frequências. Essa versatilidade de transmissão é uma vantagem significativa para sistemas que operam em diversas faixas de frequência.

No entanto, os radomes infláveis também apresentam desafios específicos. Sua integridade depende da pressurização interna, o que os torna vulneráveis a falhas elétricas. Se ocorrer uma interrupção no fornecimento de energia, o radome pode perder pressão e entrar em colapso, afetando o funcionamento da antena protegida. Para mitigar esse problema, é comum utilizar sistemas de alimentação de backup, como sistemas de energia ininterrupta (UPS), para garantir que a pressurização seja mantida mesmo em situações de falta de energia. (SHAVIT, 2018)

Outra limitação deste tipo é sua capacidade de resistir a condições ambientais extremas. Eles são menos adequados para suportar ventos fortes e outras condições climáticas adversas, o que limita seu uso em áreas expostas a tais condições.

Apesar das limitações, os radomes infláveis continuam a ser uma opção viável em certas aplicações, especialmente quando a transparência eletromagnética em uma ampla faixa de frequências é essencial. Sua capacidade de adaptação a diferentes faixas de frequência os

torna valiosos em ambientes onde a flexibilidade é fundamental. No entanto, a consideração cuidadosa das condições ambientais e a implementação de medidas de segurança são essenciais para garantir seu desempenho confiável. Em resumo, eles representam uma solução única e eficaz para a proteção de sistemas de antenas em uma variedade de aplicações, embora exijam cuidados adicionais para garantir sua operação contínua.

### 2.4.3 Radomes tipo Sanduíche (*Sandwich Radomes*)

Os *sandwich radomes*, ou radomes sanduíche, representam uma classe de radomes com características únicas e altamente eficazes em proteger sistemas de antenas e comunicação. São estruturas multilaminadas que possuem uma curvatura dupla, o que lhes confere uma forma especialmente projetada para atender a requisitos específicos de aplicações variadas. Na figura 2.9 é mostrado um radome tipo sanduíche multilaminado com a presença de diversos painéis em sua estrutura.

Figura 2.9 – Sandwich Radome.



Fonte: (SHAVIT, 2018).

A construção deles é notável por sua versatilidade. Para radomes de menor porte, eles podem ser fabricados em uma única peça, enquanto para radomes maiores, a abordagem envolve a criação de uma forma geodésica de múltiplos painéis. Esses painéis, muitas vezes de formato poligonal, são unidos por meio de parafusos para formar o radome como um todo. Essa versatilidade na construção permite que os eles se adaptem a uma ampla gama de tamanhos e geometrias, tornando-os adequados para uma variedade de aplicações (SHAVIT, 2018).

A composição dos painéis que formam a casca do radome sanduíche é essencial para seu desempenho. Esses painéis são fabricados com materiais compostos altamente desenvolvidos, projetados para proporcionar consistência e resistência. A estrutura dos painéis é geralmente composta por camadas de fibra de vidro que totalmente envolvem um núcleo central, tornando os painéis à prova de intempéries. Isso significa que esses radomes podem resistir a uma ampla gama de condições ambientais adversas, incluindo chuva, ventos fortes e exposição à radiação ultravioleta (SHAVIT, 2018).

Uma característica notável dos radomes sanduíche é seu desempenho em termos de transmissão de ondas eletromagnéticas. Eles são especialmente eficazes em frequências relativamente estreitas ou em múltiplas frequências discretas. Isso os torna ideais para sistemas que operam em bandas de frequência específicas, como radares ou sistemas de comunicação (SHAVIT, 2018).

#### 2.4.4 Radomes de estrutura metálica

Os radomes de estrutura metálica, também conhecidos como *Metal Space Frame* (MSF) *radomes*, representam uma abordagem única e robusta na proteção de antenas e sistemas de comunicação. Eles são caracterizados por sua construção que envolve a utilização de uma estrutura de suporte composta por quadros triangulares, os quais são orientados de forma aparentemente aleatória no espaço e interligados para formar uma cúpula geodésica. Um típico MSF *radome* é apresentado na figura 2.10 abaixo.

Figura 2.10 – Radome Metálico.



Fonte: (SHAVIT, 2018).

A base da estrutura dos radomes metálicos é geralmente fabricada a partir de extrusões de alumínio, conferindo-lhes uma resistência mecânica significativa. Esses quadros

metálicos servem como o esqueleto da cúpula geodésica e são essenciais para manter a integridade estrutural. Para garantir a transparência eletromagnética necessária, membranas finas feitas de materiais com baixa constante dielétrica e baixas perdas são cuidadosamente unidas aos quadros metálicos.

Um elemento importante na concepção dos MSF é a preocupação com a acumulação de chuva e neve em sua superfície. Para evitar esse problema, uma camada fina composta por politetrafluoretileno (PTFE) é permanentemente unida às membranas. Essa camada atua como um revestimento repelente à água e à neve, garantindo que esses elementos escorram facilmente da superfície do radome, sem afetar seu desempenho (SHAVIT, 2018).

Os radomes metálicos são conhecidos por sua robustez e capacidade de resistir a uma ampla gama de condições ambientais adversas. Sua construção metálica oferece proteção contra ventos fortes, granizo e outras condições climáticas desafiadoras. Além disso, a escolha de materiais dielétricos de baixa constante permite que esses radomes sejam transparentes a uma variedade de frequências, tornando-os adequados para sistemas de radar, comunicações e outros sistemas que operam em diferentes faixas de frequência (SHAVIT, 2018).

Em resumo, os radomes de estrutura metálica, ou MSF radomes, são notáveis por sua construção sólida e resistente, que combina estruturas de metal com membranas de baixa constante dielétrica. Essa combinação proporciona excelente proteção para antenas e sistemas de comunicação, garantindo transparência eletromagnética e durabilidade em ambientes desafiadores. Esses radomes continuam a ser uma escolha valiosa em aplicações que exigem desempenho confiável e resistência a condições climáticas adversas.

#### 2.4.5 Radomes de estrutura dielétrica

Os radomes de estrutura dielétrica, conhecidos como *Dielectric Space Frame* (DSF) *radome*, compartilham algumas semelhanças estruturais com os radomes de estrutura metálica (MSF), mas possuem características distintivas que os tornam adequados para aplicações específicas.

A estrutura dos DSF é composta por geometrias de painéis disponíveis em duas variações: regular ou aleatória. Esses painéis podem apresentar diferentes formas, desde planos até curvos, resultando em uma aparência geodésica multifacetada ou suavemente esférica. O que diferencia os DSF radomes dos MSF é o material utilizado nas vigas estruturais. Enquanto os MSF utilizam vigas metálicas de alumínio, os DSF empregam vigas de fibra de vidro. A

figura 2.11 abaixo mostra um DSF geodésico. É notório a semelhança com os radomes metálicos.

Figura 2.11 – DSF Radome.



Fonte: (SHAVIT, 2018).

A utilização de fibras de vidro como material estrutural confere aos DSF uma série de vantagens. Essas estruturas são mais leves em comparação com seus equivalentes de metal, o que pode ser um fator crítico em aplicações onde o peso é uma consideração importante. Além disso, são altamente transparentes a frequências mais baixas, operando eficazmente abaixo de 1 GHz. Essa capacidade de operação em frequências mais baixas é uma característica distintiva dos DSF em relação aos MSF (SHAVIT, 2018).

No entanto, é importante observar que, à medida que as frequências ultrapassam 1 GHz, os DSF podem apresentar perdas de inserção oscilantes e crescentes (SHAVIT, 2018). Nesses casos, eles se tornam a escolha mais apropriada para garantir a transparência eletromagnética necessária.

## 2.5 Avanço na tecnologia dos Radomes

Nos últimos anos, a área de comunicações e sistemas de radar tem presenciado uma notável onda de avanços tecnológicos. Essas inovações são alimentadas pela crescente demanda por sistemas eletrônicos mais eficientes e robustos. Nesse contexto, os radomes são essenciais,

assegurando que antenas e sistemas operem de forma ideal, mesmo nas condições ambientais mais desafiadoras.

Esta seção explora alguns recentes progressos no projeto de radomes, destacando as inovações que transformaram a concepção, a construção e o desempenho dessas estruturas essenciais. Nas próximas páginas, será exposto as soluções de ponta que aprimoram a transparência eletromagnética, a resistência mecânica e a durabilidade, além de permitirem a operação em uma ampla gama de frequências.

Ao adentrar nesse cenário em constante evolução tecnológica, será analisado os desenvolvimentos mais notáveis em materiais, *design* estrutural, métodos de fabricação e outros aspectos-chave. A intenção é proporcionar uma visão detalhada das tendências que atualmente estão moldando o campo dos radomes e, ao mesmo tempo, realçar a importância contínua dessas inovações no suporte a sistemas de comunicação e radar altamente sofisticados.

Por meio dessa análise aprofundada dos avanços tecnológicos em radomes, será apresentado uma visão atualizada do estado da arte, mas também inspirar futuras pesquisas e desenvolvimentos nessa área vital. Compreender as inovações recentes é fundamental para enfrentar os desafios em constante mutação no campo das comunicações e da tecnologia de defesa, garantindo que sistemas de antenas e radares continuem a operar com excelência, independentemente das condições ambientais.

### 2.5.1 Uso de Metamateriais

Metamateriais são materiais singulares com propriedades opostas às dos materiais naturais. Eles exibem propriedades elétricas incomuns, como a inversão da Lei de Snell. A definição foi cunhada em 1999 por Rodger M. Walser, da Universidade do Texas em Austin, que os descreveu como materiais macroscópicos, compostos por uma arquitetura celular tridimensional de fabricação humana, projetada para produzir uma combinação otimizada não encontrada na natureza. Em termos simples, são materiais compostos fabricados pelo homem que exibem um índice de refração negativo (KOZAKOFF, 2009).

O projeto de um radome de antena usando metamateriais tem o potencial de aprimorar o ganho da antena. Pesquisas conduzidas por Liu (2006) empregaram estruturas multicamadas compostas por dois materiais: metamateriais com índice de refração médio próximo a zero e ar. A análise demonstrou uma redução de largura de feixe de 37,5% e um aumento de ganho de antena de cerca de 6 dBi.

Em Metz (2005) foi apresentado um estudo com metamateriais para criar uma arquitetura de lente bicôncava, visando concentrar as micro-ondas transmitidas pela antena e, assim, reduzir consideravelmente os lóbulos laterais da antena. Isso sugere que esses materiais podem desempenhar um papel importante na minimização dos efeitos da degradação dos lóbulos laterais, o que é fundamental para antenas de comunicação satélites encapsuladas em radomes.

Além disso, têm sido empregados para compensar os efeitos do erro de alinhamento da antena (BSE) provocado pelo radome. Uma técnica de compensação envolve o uso de um radome de duas camadas: uma camada interna composta de metamateriais com índice de refração negativo e uma camada externa de material dielétrico convencional com índice de refração positivo. A espessura e os índices de refração desses materiais são ajustados de forma que um feixe de energia eletromagnética que passa pelo radome não seja efetivamente refratado (SHAVIT, 2018).

Essas aplicações inovadoras de metamateriais no projeto de radomes ilustram o potencial significativo desses materiais artificiais para otimizar o desempenho das antenas, minimizar os efeitos indesejados e expandir os horizontes da engenharia de radomes. Essa pesquisa representa um avanço substancial na busca por soluções cada vez mais sofisticadas para atender às crescentes demandas de comunicações e sistemas de radar.

### 2.5.2 Radomes Seletivos de Frequência

*Frequency Selective Radomes (FSR)*, ou Radomes Seletivos de Frequência, são estruturas especiais que incorporam uma superfície seletiva de frequência para controlar a passagem de ondas eletromagnéticas. Esses radomes são usados principalmente em aplicações de radar e comunicações, onde a seletividade de frequência desempenha um papel crítico na prevenção de interferências indesejadas (KOZAKOFF, 2009).

A principal função de um FSR é permitir que as ondas eletromagnéticas de determinadas frequências passem através do radome, enquanto bloqueiam ou atenuam ondas de frequências diferentes. Isso é alcançado usando uma superfície seletiva de frequência, que consiste em uma matriz de elementos condutores ou estruturas ressonantes projetadas para responder seletivamente a determinadas frequências.

Existem várias aplicações importantes para os Radomes Seletivos de Frequência. Um dos principais usos é a eliminação de interferência, protegendo antenas e sistemas de comunicação contra interferência de transmissores próximos que operam em frequências

diferentes. Isso é especialmente importante em ambientes onde várias antenas compartilham uma plataforma ou em áreas densamente povoadas de espectro eletromagnético.

Além disso, os FSRs são usados para proteger sistemas sensíveis, como antenas IRIDIUM, contra interferência de transmissores de alta potência na mesma plataforma. Eles também podem ser empregados para aprimorar o desempenho de sistemas, reduzindo interferências e melhorando a sensibilidade do sistema a frequências específicas de interesse (KOZAKOFF, 2009).

As antenas IRIDIUM são antenas projetadas para comunicações via satélite utilizando o sistema de comunicações. O IRIDIUM é uma constelação de satélites em órbita baixa da Terra que fornece serviços de comunicações globais, incluindo voz e dados, para áreas remotas, marítimas e aéreas em todo o mundo (KOZAKOFF, 2009).

Essas antenas são projetadas para operar em frequências específicas alocadas para o sistema de satélites IRIDIUM. Elas são usadas em uma variedade de aplicações, incluindo comunicações marítimas, aviação, comunicações em áreas remotas e outros cenários onde o acesso a redes terrestres de comunicações pode ser limitado.

Em alguns casos, os FSRs são usados para reduzir reflexões de sinais, minimizando os efeitos de eco em sistemas de radar. A tecnologia por trás dos Radomes Seletivos de Frequência envolve o projeto cuidadoso da matriz de elementos seletivos de frequência, projetados para responder a frequências específicas. A seleção das frequências-alvo e o ajuste preciso desses elementos são fundamentais para o funcionamento eficaz de um FSR (PURINTON, 1976).

Em resumo, os Radomes Seletivos de Frequência desempenham um papel essencial na proteção e aprimoramento de sistemas de comunicação e radar, garantindo que apenas as frequências desejadas sejam transmitidas ou recebidas, enquanto bloqueiam interferências indesejadas. Eles são uma ferramenta valiosa em ambientes onde a gestão de frequências e a prevenção de interferências são essenciais.

### 2.5.3 *Concealed Radomes*

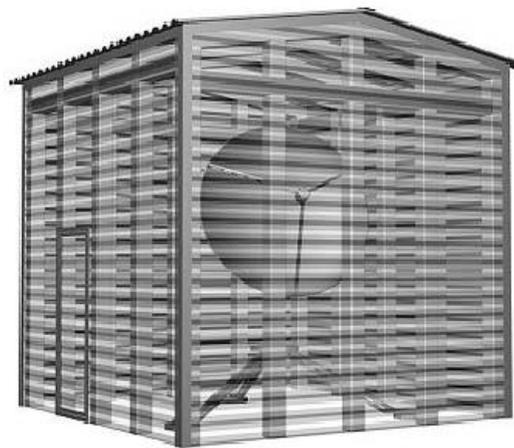
Os *Concealed Radomes*, também conhecidos como Radomes de ocultação, representam uma solução para as complexidades enfrentadas por empresas de telecomunicações ao instalar antenas sensíveis de micro-ondas e comunicações via satélite (SATCOM) em ambientes urbanos sujeitos a regulamentações de zoneamento, convenções de desenvolvimento de terrenos e outras restrições legais. A necessidade de ocultar antenas em

áreas urbanas é evidente, uma vez que as estruturas convencionais podem não se integrar bem ao cenário urbano e podem enfrentar barreiras legais (KOZAKOFF, 2009).

Esses radomes foram projetados para oferecer uma solução altamente eficaz. Eles são caracterizados por sua capacidade de camuflar antenas sensíveis e outros equipamentos de comunicação, de forma que se misturem de maneira quase invisível ao ambiente circundante. A principal inovação reside na escolha de formas estruturais criativas e na construção com materiais plásticos de alta qualidade, garantindo uma longa vida útil. Essa combinação permite que essas estruturas sejam discretamente incorporadas ao ambiente urbano, passando despercebidas pela maioria das pessoas.

As vantagens dos *Concealed Radomes* são diversas. Eles são projetados para oferecer baixa visibilidade, sendo capazes de se assemelhar a edifícios ou estruturas existentes, integrando-se ao ambiente sem causar impacto visual negativo. Além disso, sua durabilidade é uma característica notável, graças aos materiais plásticos resistentes que suportam as condições climáticas e ambientais. Sendo estruturas leves, a instalação torna-se mais eficiente, reduzindo os desafios logísticos. Um exemplo deles é mostrado figura 2.12 abaixo.

Figura 2.12 – *Concealed Radome*.



Fonte: (KOZAKOFF, 2009).

O grande apelo dos *Concealed Radomes* está na adaptabilidade. Eles podem ser personalizados para atender a diferentes requisitos urbanos e de comunicação. Isso permite que as operadoras de telecomunicações ajam conforme as regulamentações locais e mantenham a estética do ambiente. Essas estruturas oferecem uma solução criativa para o desafio de equilibrar a necessidade de conectividade eficaz com o respeito ao cenário urbano.

## 2.6 Materiais Dielétricos para Radomes

Uma parte essencial desse processo é a seleção adequada de materiais dielétricos, que são muito importantes na transmissão eficaz de ondas eletromagnéticas. Os materiais dielétricos têm propriedades elétricas distintas, como a permissividade dielétrica e a tangente de perdas, essenciais para garantir a integridade dos sistemas de radar e comunicação.

Esses materiais dielétricos podem ser divididos em duas categorias principais: materiais orgânicos e inorgânicos. Cada categoria apresenta propriedades distintas e é selecionada com base nas especificações de cada aplicação. Os materiais dielétricos desempenham um papel crítico na transparência eletromagnética, resistência às intempéries e durabilidade dos radomes, e são essenciais para garantir que os sinais de radar, comunicação e outras frequências eletromagnéticas sejam transmitidos eficazmente (KOZAKOFF, 2009).

Nesta seção, será explorado em detalhes a importância dos materiais dielétricos em radomes, discutindo as propriedades desses materiais, suas aplicações e como eles influenciam o desempenho deles em ambientes marítimos, aéreos e terrestres.

### 2.6.1 Materiais Orgânicos

Os materiais dielétricos de origem orgânica desempenham um papel de considerável importância na fabricação de radomes para sistemas de comunicação e radares. A seleção entre radomes construídos com materiais dielétricos orgânicos de estrutura monolítica e aqueles do tipo sanduíche, varia conforme as necessidades particulares de cada aplicação e as características desejadas para o projeto (KOZAKOFF, 2009).

Radomes monolíticos são construídos com um único material dielétrico que cobre a antena e os componentes eletrônicos. Os materiais dielétricos orgânicos, como polímeros reforçados com fibras de vidro, são comuns nesse contexto. Eles oferecem uma combinação de boas propriedades dielétricas, facilidade de fabricação e durabilidade. Além disso, esses materiais podem ser moldados em formas complexas para atender às necessidades de design.

Radomes tipo sanduíche são compostos por camadas de materiais dielétricos que incluem painéis externos e um núcleo. Os painéis externos podem ser feitos de materiais compósitos orgânicos, enquanto o núcleo pode ser preenchido com poliestireno expandido (EPS) ou outros materiais de baixa permissividade. Essa configuração é eficaz para alcançar propriedades dielétricas desejadas, como permissividade dielétrica e tangente de perdas, enquanto mantém o radome leve.

A escolha entre radomes monolíticos e tipo sanduíche depende dos requisitos de cada aplicação. Radomes monolíticos são usados quando a simplicidade de design e a facilidade de fabricação são fundamentais, enquanto os radomes tipo sanduíche são preferidos quando propriedades dielétricas mais específicas são necessárias, como redução da tangente de perdas ou ampla faixa de frequência. Cada abordagem tem suas vantagens e desvantagens, e a seleção do material e design dependerá das necessidades do sistema e das metas de desempenho do radome. Compreender essas distinções é essencial para o projeto eficaz de radomes em sistemas de comunicação e radares.

A tabela abaixo mostra alguns destes materiais e suas permissividades relativas e tangente de perdas.

Tabela 1 – Tabela de Materiais Orgânicos.

<b>Material</b>	<b>Permissividade Relativa, Banda X</b>	<b>Tangente de Perdas, Banda X</b>	<b>Permissividade Relativa, Banda Ka</b>	<b>Tangente de Perdas, Banda Ka</b>
<b>Rexolite</b>	2.54	0.0005	2.6	0.002
<b>Náilon</b>	3.03–3.21	0.014–0.02	3.6	0.02
<b>Teflon</b>	2.1	0.0003	2.08–2.10	0.0006–0.001
<b>Poliestireno</b>	2.55	0.0004	2.54	0.00053–0.001
<b>Plexiglás</b>	2.59	0.015	2.61	0.02
<b>Polietileno</b>	2.25	0.0004	2.28	0.007

Fonte: (KOZAKOFF, 2009).

## 2.6.2 Materiais Inorgânicos

Em contraste com os materiais dielétricos orgânicos, a resistência mecânica de muitos materiais inorgânicos começa a degradar por volta dos 250°C e, na melhor das hipóteses, eles apenas sobrevivem por um curto período a temperaturas de cerca de 500°C. Para aplicações de alta temperatura, como mísseis hipersônicos, são frequentemente empregados materiais radome não-orgânicos, geralmente cerâmicos. A maioria desses materiais apresenta propriedades elétricas adequadas para aplicações em radomes de alta velocidade, como mísseis (CORY, 1972). A tabela 2 mostra alguns destes materiais e suas respectivas propriedades elétricas.

Alguns dos materiais dielétricos inorgânicos amplamente utilizados em radomes incluem:

- A alumina é um material cerâmico durável com boas propriedades dielétricas. É frequentemente usado em aplicações de radome que envolvem altas temperaturas e velocidades supersônicas. Possui uma boa resistência à erosão causada pela chuva, tornando-o adequado para missões em alta velocidade.
- O *Pyroceram* é outro material cerâmico, mais especificamente à base de cordierita. Ele possui uma constante dielétrica relativamente alta e é adequado para aplicações de alta velocidade. No entanto, suas tolerâncias mecânicas na fabricação precisam ser rigorosamente controladas devido à sua alta constante dielétrica.

O *Rayceram* é semelhante ao *Pyroceram*, sendo uma cerâmica à base de cordierita que oferece boas propriedades dielétricas e é resistente a altas temperaturas. Também é usado em radomes para aplicações de alta velocidade.

Tabela 2 – Tabela de Materiais Inorgânicos.

<b>Material</b>	<b>Permissividade Relativa, Banda X</b>	<b>Tangente de Perdas, Banda X</b>
<b>Alumina</b>	9.4–9.6	0.0001–0.0002
<b>Nitreto de boro</b>	4.2–4.6	0.0001–0.0003
<b>Berílio</b>	4.2	0.0005
<b>Vidro borossilicato</b>	4.5	0.0008
<b>Pirocerâmica</b>	5.54–5.65	0.0002
<b><i>Rayceram</i></b>	4.70–4.85	0.0002
<b><i>Slip cast fused silica</i> (SCFS)</b>	3.30–3.42	0.0004
<b>Quartzo entrelaçado (3D)</b>	3.05–3.1	0.001–0.005
<b>Nitreto de silício (HPSN)</b>	7.8–8.0	0.002–0.004
<b>Nitreto de silício (RSSN)</b>	5.6	0.0005–0.001
<b>Nitro-oxicerâmica</b>	5.2	0.002
<b>Feldspato mineral</b>	6.74	0.0009

Fonte: (KOZAKOFF, 2009).

Esses materiais inorgânicos são escolhidos por sua capacidade de manter suas propriedades elétricas em ambientes extremos. Em missões de alta velocidade, como mísseis hipersônicos ou veículos espaciais, onde as temperaturas podem ser extremamente elevadas e

as condições ambientais desafiadoras, a durabilidade e a estabilidade elétrica desses materiais são essenciais na proteção das antenas e sensores contidos nos radomes (KOZAKOFF, 2009).

A escolha entre materiais dielétricos inorgânicos e orgânicos depende das demandas específicas de cada aplicação, levando em consideração fatores como a velocidade do veículo, a temperatura de operação, a resistência à erosão causada pela chuva e as características dielétricas necessárias. A combinação correta de materiais dielétricos é essencial para garantir o desempenho adequado do radome em seu ambiente de operação.

## **2.7 Influência das intempéries no meio marítimo**

O ambiente marítimo é notoriamente desafiador para antenas e equipamentos eletrônicos devido à exposição a uma variedade de intempéries que podem afetar adversamente o desempenho e a durabilidade desses sistemas.

A exposição constante à água salgada, com suas propriedades corrosivas, é uma das maiores preocupações no ambiente marítimo. A água salgada pode acelerar a corrosão de componentes metálicos, como antenas, conectores e estruturas de suporte. A corrosão enfraquece os materiais e pode causar falhas estruturais ou problemas elétricos, impactando negativamente o desempenho. Isso torna essencial a seleção de materiais resistentes à corrosão e técnicas de revestimento adequadas.

A precipitação constante, incluindo chuvas e neblina, é uma característica comum no ambiente marítimo. Quando a água se acumula nas superfícies de antenas e equipamentos eletrônicos, ela pode interferir nos componentes internos. A água pode causar curtos-circuitos, alterar as características elétricas dos componentes e até mesmo diminuir a eficácia de superfícies de recepção. A proteção contra a penetração de água é, portanto, um aspecto crítico na concepção de sistemas marítimos.

O ambiente marítimo frequentemente apresenta ventos fortes e rajadas que podem exercer pressão significativa nas antenas e nas estruturas de suporte. Essa pressão do vento pode levar a danos físicos, incluindo flexão, deformação ou mesmo quebra de antenas. A resistência das estruturas e o projeto robusto são essenciais para garantir a estabilidade dos sistemas em condições de ventos fortes.

Em embarcações em movimento, as ondas e o spray do mar são inevitáveis. Esses elementos podem ser pulverizados diretamente nas antenas e equipamentos eletrônicos. Essa exposição à água salgada é preocupante, já que a água pode infiltrar-se nas superfícies e causar

danos. Assim, é importante empregar técnicas eficazes de vedação e proteção para evitar a entrada de água.

O ambiente marítimo também está sujeito à radiação solar intensa, que, combinada com a reflexão da luz do sol na água, pode aumentar as temperaturas em superfícies expostas. Isso pode causar estresse térmico nos componentes eletrônicos, afetando sua vida útil e desempenho. Proteções adequadas, como revestimentos reflexivos, são necessárias para minimizar esse problema.

As variações de temperatura no ambiente marítimo são notáveis, com noites mais frias e dias mais quentes. Essas flutuações de temperatura podem causar condensação nos componentes eletrônicos e contribuir para o estresse térmico. A condensação pode levar a problemas elétricos e à degradação de componentes. Portanto, o controle da temperatura e a ventilação adequada são considerações importantes.

Embarcações em movimento estão sujeitas a choques mecânicos e vibrações devido ao balanço e às ondas. Isso pode resultar na soltura de componentes internos ou em danos causados pelas vibrações constantes. A resistência à vibração e à proteção contra choques são fundamentais para a durabilidade dos sistemas.

As áreas marinhas frequentemente enfrentam tempestades e a possibilidade de raios. Descargas elétricas representam uma ameaça significativa para equipamentos eletrônicos e sistemas sensíveis. Portanto, medidas de proteção contra raios e sistemas de aterramento adequados são essenciais.

A alta salinidade do ar marinho pode causar a formação de depósitos de sal nas superfícies de antenas e equipamentos eletrônicos. Esses depósitos de sal podem agravar ainda mais os problemas de corrosão e afetar o desempenho do sistema.

Todos esses fatores combinados tornam o ambiente marítimo extremamente desafiador para antenas e eletrônicos. Portanto, a escolha de materiais resistentes à corrosão, o design robusto e a implementação de técnicas eficazes de proteção são críticos para garantir o desempenho e a durabilidade dos sistemas nesse ambiente hostil. Além disso, a seleção cuidadosa de radomes, revestimentos e materiais de vedação desempenha um papel fundamental na preservação desses sistemas no ambiente marítimo.

## **2.8 Radomes em meios navais**

Durante a Guerra Fria, as marinhas de várias nações começaram a incorporar sistemas de radar mais avançados em suas embarcações. O aumento das ameaças de mísseis

balísticos e a necessidade de rastreamento preciso exigiram radomes mais sofisticados. Nessa época, a tecnologia começou a se concentrar em projetos aerodinâmicos e formas que minimizassem a interferência na aerodinâmica dos navios (SHAVIT, 2018).

À medida que a eletrônica naval se tornava mais complexa, os radomes desempenhavam um papel fundamental na integração de sistemas. Novos materiais compósitos e avanços na fabricação permitiram a criação de radomes de alta qualidade que forneciam proteção e transparência apropriada para as ondas de radar (SKOLNIK, 2008).

Os radomes em submarinos representam um desafio significativo devido às profundidades extremas em que essas embarcações operam. Além da necessidade de manter a transparência eletromagnética para as antenas, os radomes submarinos precisam resistir a pressões submarinas elevadas. Esse é um dos principais obstáculos enfrentados no desenvolvimento desses componentes essenciais. A literatura oferece uma série de artigos dedicados ao estudo e à pesquisa sobre radomes em submarinos, abordando aspectos importantes de *design*, materiais e desempenho para garantir a integridade das comunicações subaquáticas e a segurança das operações submarinas. Essas fontes são valiosas para entender os avanços e desafios nesse campo especializado.

A comunicação subaquática é uma necessidade crítica para submarinos, uma vez que eles passam a maior parte do tempo submersos. Os radomes são usados para abrigar antenas de comunicação subaquáticas, permitindo que os submarinos se comuniquem com outras embarcações ou centros de comando, mesmo quando estão submersos a grandes profundidades. Esses radomes são projetados para serem resistentes à água do mar e fornecer uma conexão confiável com antenas de superfície ou satélites.

A evolução dos radomes no meio naval continua a avançar rapidamente. As necessidades de interoperabilidade e comunicação em rede resultaram em radomes mais versáteis, permitindo a passagem eficiente de ondas de rádio e micro-ondas. Novos materiais dielétricos, como cerâmica e metamateriais, estão sendo explorados para melhorar ainda mais o desempenho dos radomes navais. Além disso, a integração de antenas de banda larga, como as usadas em comunicações via satélite, tornou-se uma parte importante da evolução dos radomes no meio naval.

A Marinha do Brasil, em sua constante busca por avanços tecnológicos e aprimoramento de suas capacidades de comunicação e vigilância, está no epicentro de um projeto inovador. Trata-se do desenvolvimento de um radome especialmente concebido como parte integrante MAGE Defensor Mk3, um dos sistemas de Guerra Eletrônica que equiparão as

futuras fragatas da classe Tamandaré. Na figura 2.13 é mostrado uma maquete da antena protegida pelo radome.

A singularidade desse projeto radica no fato de que o material usado na construção do radome precisou ser importado, demonstrando o comprometimento da Marinha com a inovação e a qualidade técnica necessária para suas operações. O investimento em tecnologia de ponta é uma prova do esforço contínuo da instituição em manter-se na vanguarda da defesa nacional. O radome, quando instalado no MAGE Defensor, permitirá que a fragata opere em ambientes desafiadores, mantendo sua capacidade de detecção e comunicação mesmo sob condições adversas (PADILHA, 2021).

Figura 2.13 – Maquete do MAGE Defensor MK3.



Fonte: (PADILHA, 2021).

O fato de o material, para a confecção do radome, precisar ser importado, ressalta uma questão fundamental que deve ser considerada no âmbito da defesa nacional: a necessidade de fomentar a indústria nacional para a produção de materiais de alta tecnologia e alto grau de pureza. O fato de depender de importações para suprir demandas essenciais no setor de defesa sublinha a urgência de investir em pesquisa, desenvolvimento e inovação no país. O fortalecimento da indústria nacional em áreas de alta tecnologia é estratégico não apenas para a segurança do Brasil, mas também para o crescimento econômico sustentável e a promoção de autonomia tecnológica. A busca pela produção local desses materiais representa um passo decisivo na construção de uma base industrial capaz de atender às necessidades das Forças Armadas e, ao mesmo tempo, contribuir para o desenvolvimento econômico do país.

Este projeto, Mage Defensor Mk3, é fruto de uma colaboração efetiva entre a Marinha do Brasil, empresa Omnisys e a empresa LACE, esta última hoje denominada Ocellot. O desenvolvimento do radome também contou com a participação da empresa ALLTEC. Essa parceria tem permitido que especialistas civis e militares trabalhem juntos para atingir o mais

alto padrão de qualidade e desempenho. O envolvimento do setor privado demonstra como a inovação tecnológica na área de defesa não é apenas uma questão de interesse governamental, mas uma sinergia que impulsiona a economia e a pesquisa no Brasil (PADILHA, 2021).

O Radome, como parte do projeto do Mage, está atualmente em fase de testes no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) em câmara anecoica, necessário para a etapa de calibração do sistema, sem o qual o MAGE não alcançaria a performance necessária para sua correta operação. A câmara anecoica reproduz um ambiente de Espaço Livre. Suas paredes são recobertas de material absorvedor de energia eletromagnética, que minimizam a reflexão, e a interferência sobre o sistema que está sob testes. Sem uma câmara anecoica, não seria possível realizar medidas e calibração de sistemas de radiofrequências (RF) (PADILHA, 2021).

O sucesso deste projeto terá função essencial nas futuras classes Tamandaré, manter a superioridade situacional e a consciência tática, contribuindo diretamente para a segurança das águas brasileiras e a defesa dos interesses nacionais. Além disso, ele reforça a importância do setor de defesa como um vetor de desenvolvimento tecnológico e econômico para o país.

O radome desenvolvido pela Marinha do Brasil, representa um exemplo emblemático de inovação e cooperação entre instituições governamentais e a indústria privada. Ao garantir que o sistema de defesa nacional esteja equipado com a mais recente tecnologia e conhecimento, a Marinha consolida sua posição como um ator de destaque no cenário internacional e contribui para a prosperidade e a segurança do Brasil.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia e as técnicas empregadas variam dependendo da natureza da pesquisa, dos objetivos estabelecidos e das questões formuladas. Portanto, esta seção visa apresentar uma visão abrangente de como a pesquisa foi estruturada, destacando a abordagem, as ferramentas e as técnicas utilizadas para coletar e analisar dados. A metodologia aqui apresentada aborda tanto os aspectos qualitativos quanto os quantitativos da pesquisa, visando uma compreensão completa e abrangente do tópico de estudo.

A análise de dados desempenha um papel essencial na pesquisa. Este capítulo discutirá como os dados coletados foram processados, os métodos estatísticos e de análise empregados e a interpretação dos resultados. Medidas de validade e confiabilidade dos resultados também serão discutidas.

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

Este estudo se enquadra na categoria de pesquisa fundamental, cujo foco principal reside na expansão do conhecimento científico no campo de radomes e sua aplicação específica em ambientes marítimos. A classificação da pesquisa é um elemento essencial deste trabalho, pois ajuda a delinear a natureza, os objetivos e o alcance da investigação, fornecendo uma estrutura conceitual que orienta o desenvolvimento da pesquisa.

A pesquisa fundamental é caracterizada por seu compromisso em desvendar os princípios fundamentais subjacentes a um fenômeno ou área de estudo, sem necessariamente buscar uma aplicação prática imediata. No contexto deste estudo, a busca se concentra em uma compreensão abrangente dos radomes, que desempenham um papel vital na proteção de antenas em ambientes navais, e em como essas estruturas afetam a propagação e a integridade dos sinais eletromagnéticos. Os objetivos incluem a exploração dos princípios teóricos que norteiam o funcionamento dos radomes e seu impacto na qualidade das comunicações e no desempenho de radares em meios navais.

Esta pesquisa não apenas aborda o papel crítico dos radomes na proteção de antenas em ambientes marítimos, mas também contribui para o conhecimento global relacionado à teoria e ao design dessas estruturas. A classificação da pesquisa como "fundamental" ressalta o compromisso com a expansão do conhecimento científico, explorando as complexidades subjacentes à função dos radomes em um contexto marítimo e lançando luz sobre questões

teóricas e práticas que beneficiarão tanto a comunidade acadêmica quanto as aplicações práticas no campo da defesa naval e comunicações marítimas.

### 3.1.1 Quanto aos fins

Este estudo se enquadra na categoria de pesquisa exploratória. Isso significa que o principal objetivo é aprofundar a compreensão dos conceitos essenciais relacionados aos radomes em contextos marítimos. A classificação da pesquisa quanto aos fins é importante na definição da extensão e do método adotado nesta investigação, uma vez que a intenção é investigar as complexidades dessas estruturas em ambientes navais.

A pesquisa exploratória é caracterizada por seu foco em explorar tópicos complexos, identificar questões centrais e adquirir uma visão mais profunda das dinâmicas subjacentes a um campo de estudo. Neste cenário, a pesquisa pretende descobrir e mapear os detalhes relacionados aos radomes em ambientes marítimos, desde sua evolução histórica até suas implicações nos equipamentos eletrônicos e nas comunicações navais.

Ao optar pela pesquisa exploratória, foi reconhecido a importância de estabelecer uma base sólida de conhecimento e compreensão sobre o funcionamento dos radomes e seu papel fundamental na proteção de antenas em ambientes navais. A abordagem inclui a revisão e a síntese da literatura especializada, a identificação de lacunas no conhecimento existente e a coleta de informações que permitirão a formulação de perguntas de pesquisa mais específicas.

A pesquisa exploratória busca contribuir para a geração de hipóteses e teorias que podem ser posteriormente testadas e aprofundadas por meio de estudos mais direcionados. Os esforços têm o propósito de fornecer uma base sólida que orientará investigações futuras, possibilitando a expansão do conhecimento científico no campo dos radomes e suas implicações na proteção de antenas em contextos navais.

### 3.1.2 Quanto aos meios

A presente pesquisa é classificada como uma investigação de natureza quantitativa, concentrando-se na análise numérica e na obtenção de dados objetivos relacionados ao tema "Radomes - Proteção para Antenas em Meios Navais". A classificação da pesquisa quanto aos meios desempenha um papel fundamental na determinação das estratégias de coleta, análise e interpretação dos dados, bem como na abordagem metodológica adotada ao longo deste estudo.

A pesquisa quantitativa é caracterizada por seu compromisso com a coleta de informações mensuráveis e verificáveis. No contexto dos radomes e de sua aplicação em ambientes navais, essa abordagem permite a aquisição de dados objetivos relacionados a parâmetros como eficiência de proteção, desempenho de antenas, características estruturais, propriedades de materiais e outros fatores quantificáveis. Essa metodologia é especialmente relevante ao explorar a eficácia dos radomes na proteção de antenas e equipamentos eletrônicos em ambientes marítimos.

A pesquisa quantitativa envolve a coleta sistemática de informações por meio de técnicas como levantamentos, medições, análises de dados e modelagem numérica. No contexto deste estudo, foi empregado métodos de coleta de dados que permitem a quantificação precisa de variáveis relacionadas aos radomes, tais como suas características físicas, desempenho elétrico, comportamento sob condições climáticas adversas e muito mais.

Uma das principais vantagens da pesquisa quantitativa reside na objetividade dos resultados obtidos, tornando-os passíveis de análise estatística. A análise quantitativa dos dados coletados permite identificar tendências, relações de causa e efeito, correlações e padrões que contribuem para uma compreensão aprofundada das implicações dos radomes em ambientes navais.

A abordagem quantitativa adotada neste estudo visa fornecer uma visão embasada em dados, alicerçada na análise numérica e na utilização de métricas mensuráveis. Ao longo das próximas seções, você encontrará uma exploração detalhada dos resultados e descobertas provenientes dessa metodologia. A pesquisa quantitativa permitirá avançar na compreensão das complexidades dos radomes em ambientes marítimos, contribuindo para a ampliação do conhecimento científico nesse campo.

### **3.2 Limitações do Método**

As limitações relacionadas aos acessos aos dados, ao tamanho da amostra, à complexidade dos radomes, ao uso de dados experimentais e simulações, às restrições de equipamentos e recursos e à limitação da instrumentação:

Em relação ao acesso aos dados, este estudo dependeu fortemente das informações disponíveis publicamente e da colaboração com instituições que compartilharam seus dados. A escassez de dados específicos e detalhados sobre radomes em ambientes navais pode ter restringido a profundidade da análise e a compreensão completa de certos cenários e casos de uso.

A limitação do tamanho da amostra é uma consideração fundamental. Embora tenha sido analisado uma amostra representativa, a pesquisa não abordou todas as variações de *design* e materiais de radomes disponíveis no mercado. Um tamanho de amostra maior teria permitido uma análise mais robusta e possivelmente resultados mais generalizáveis.

Devido à complexidade dos radomes usados em ambientes navais, é importante reconhecer que a pesquisa não pode abranger todos os tipos de radomes existentes. Cada variação de *design* apresenta desafios específicos, e o estudo se concentrou em características gerais, o que pode limitar a compreensão das implicações de diferentes tipos de radomes.

A pesquisa empregou uma combinação de dados experimentais e simulações para avaliar o desempenho dos radomes. No entanto, as simulações podem não capturar todas as complexidades das condições do mundo real, e a validação dos modelos de simulação é uma tarefa crítica que pode exigir esforço adicional. Além disso, a coleta de dados experimentais sob uma ampla gama de condições foi limitada.

As restrições de equipamentos e recursos também são relevantes. Limitações orçamentárias e técnicas influenciaram a seleção de equipamentos de medição e técnicas de teste. Equipamentos de alta precisão nem sempre estavam disponíveis, o que poderia afetar a precisão das medições e limitar a abrangência das análises.

Finalmente, a qualidade da instrumentação utilizada na pesquisa também apresenta limitações. A medição precisa de características de radomes, como permissividade e perda de materiais, é fortemente dependente da qualidade dos instrumentos. Limitações tecnológicas e de equipamento podem ter afetado a exatidão das medições, o que impacta a robustez dos resultados.

Em resumo, estas limitações ressaltam as considerações práticas e técnicas enfrentadas ao conduzir a pesquisa. Reconhecer essas limitações é essencial para interpretar os resultados com sensatez e para identificar áreas nas quais pesquisas futuras podem se concentrar para superar esses desafios. A pesquisa é um processo contínuo, e as limitações identificadas podem orientar estudos subsequentes para aprimorar a compreensão e o desempenho dos radomes em ambientes navais.

### **3.3 Universo e Amostragem**

A sessão de universo e amostragem do presente trabalho de conclusão de curso visa discutir a metodologia de simulação empregada para avaliar os materiais de radomes em um contexto de comunicações navais, com foco na faixa de frequência da banda X (8 a 12 GHz).

Esta seção aborda a escolha dos materiais e o processo de simulação usando o software Ansys® HFSS™, bem como a análise das características de transparência eletromagnética desses materiais.

Para conduzir a simulação, foram selecionados quatro materiais diferentes: alumina, TC250, acrílico (polimetilmetacrilato) e teflon. Cada um desses materiais representa uma classe de substâncias frequentemente utilizadas na construção de radomes, variando em termos de permissividade dielétrica e tangente de perdas. As simulações foram realizadas em um guia de ondas WR-90 simulado, com uma distância de  $0,55\lambda_c$  (comprimento de onda no vácuo) entre as portas eletromagnéticas e a amostra, a fim de evitar efeitos de transientes e singularidades.

A análise dos resultados revelou a resposta de cada material à faixa de frequência da banda X, que é crítica em aplicações de sensores navais. Os resultados variaram de maneira significativa, com potências refletidas e passantes diferentes para cada material.

Essas simulações permitiram avaliar como cada material se comporta em condições de frequência semelhantes às encontradas em sistemas de comunicações navais. Os valores específicos de permissividade dielétrica e tangente de perdas influenciaram a resposta de cada material, destacando a importância de escolher materiais adequados na construção de radomes para garantir a eficiência das comunicações e a proteção das antenas em meios navais.

Essa análise é relevante, pois ajuda a definir quais materiais são mais adequados para aplicações específicas e contribui para o desenvolvimento de radomes de alto desempenho. Além disso, fornece uma compreensão mais profunda das características elétricas dos materiais em frequências críticas para a comunicação naval, o que é essencial para o avanço da tecnologia de proteção de antenas em ambientes marítimos.

### **3.4 Coleta e Tratamento de Dados**

A pesquisa fundamentou-se primariamente em uma revisão bibliográfica abrangente, incluindo a análise minuciosa de artigos científicos, livros, teses acadêmicas e publicações técnicas reconhecidas. Essas fontes, renomadas em seus respectivos campos, proporcionaram uma base sólida para a compreensão dos princípios teóricos subjacentes aos radomes, os materiais dielétricos empregados, as características das ondas eletromagnéticas, e as aplicações em contextos navais.

A coleta de dados em pesquisas desse escopo é uma tarefa complexa e multifacetada, demandando a integração de informações provenientes de diversas fontes. Esse processo abrange ainda a aplicação de ferramentas computacionais avançadas. A rigorosa coleta de dados é de importância vital para estabelecer uma base sólida que sustenta as análises e conclusões apresentadas neste estudo.

Primeiramente, a pesquisa se apoiou extensivamente em uma revisão bibliográfica detalhada. Foram consultados artigos científicos, livros, teses acadêmicas e publicações técnicas de renome. Essas fontes forneceram uma base sólida para compreender os princípios teóricos subjacentes aos radomes, os materiais dielétricos utilizados, as características das ondas eletromagnéticas e as aplicações em meios navais.

Além disso, as simulações desempenharam um papel fundamental na coleta de dados para este estudo. O software HFSS (Ansys *High-Frequency Structure Simulator*) foi empregado para modelar e analisar o comportamento dos radomes com diferentes materiais dielétricos. Essas simulações incluíram estudos de propriedades dielétricas, análise de propagação de ondas e considerações de desempenho de antenas. Abaixo é apresentado a tela de entrada do software.

Figura 3.1: Tela de entrada do Ansys HFSS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados coletados nas simulações envolveram parâmetros críticos, como permissividade dielétrica, perdas, reflexão de ondas, atenuação e outros fatores relevantes para avaliar a eficácia dos radomes em ambientes navais. Para garantir a confiabilidade dos dados, as simulações foram realizadas considerando diferentes tipos de materiais confrontados com

frequências na banda X, muito utilizada em meios navais, principalmente em radares de navegação.

A análise dos dados também incluiu a avaliação de padrões de radiação de antenas protegidas por radomes na banda X, com o objetivo de entender como os radomes afetam o desempenho das antenas em termos de ganho e possíveis degradações devido à presença do radome. Além disso, foram realizadas comparações entre diferentes materiais dielétricos para identificar aqueles que oferecem as melhores propriedades de transparência nesta faixa de frequências e as menores perdas de sinal.

O tratamento dos dados permitiu uma análise profunda dos resultados das simulações e a extração de informações significativas sobre a eficácia dos radomes na proteção de antenas em meios navais. Os dados processados e as análises resultantes constituíram a base para as conclusões deste estudo e contribuíram para o entendimento abrangente das questões relacionadas a esse tópico específico.

Ao combinar informações provenientes de fontes bibliográficas e simulações computacionais, este estudo se beneficia da complementaridade entre o conhecimento teórico e a avaliação prática, proporcionando uma compreensão abrangente e aprofundada das questões relacionadas aos radomes em meios navais. A coleta de dados representou um passo fundamental no desenvolvimento deste trabalho, permitindo a exploração de conceitos complexos e a geração de conhecimentos valiosos para a área de proteção de antenas em ambientes marítimos.

### **3.5 Métodos de Linha de Transmissão**

Os métodos de linha de transmissão são técnicas fundamentais usadas na engenharia de micro-ondas e comunicações para projetar, analisar e compreender a propagação de sinais e energia ao longo de linhas de transmissão. Linhas de transmissão são estruturas físicas projetadas para transportar ondas eletromagnéticas de um ponto a outro. Isso inclui cabos coaxiais, guias de onda, linhas de microfita e outras estruturas similares (ANDRADE, 2022).

Essas técnicas se concentram em descrever como as ondas eletromagnéticas se comportam dentro das linhas de transmissão, considerando fatores como a impedância característica, a atenuação, a distorção do sinal e a reflexão de ondas em diferentes interfaces. Os métodos de linha de transmissão também são essenciais para garantir a correspondência de impedância entre os componentes de um sistema de comunicação, minimizando perdas de sinal e garantindo a transmissão eficaz de energia (ANDRADE, 2022).

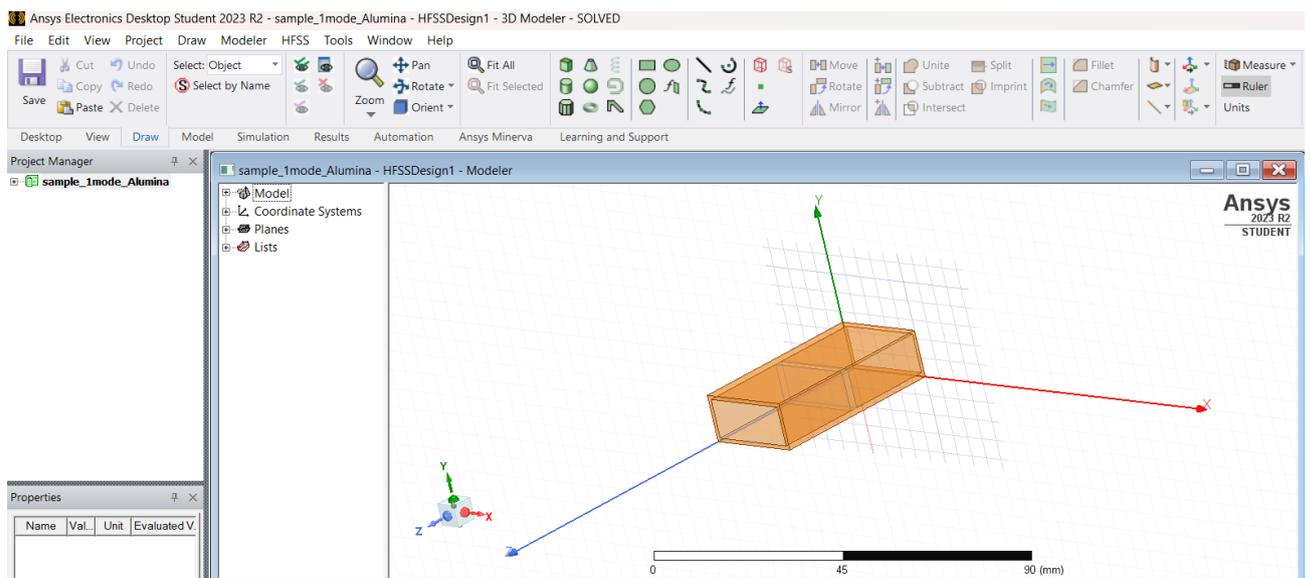
O uso de métodos de linha de transmissão é vital na análise e projeto de sistemas de comunicação, circuitos de RF (rádiofrequência) e dispositivos de micro-ondas. Engenheiros e pesquisadores empregam essas técnicas para otimizar o desempenho de sistemas de comunicação e para solucionar problemas relacionados à propagação de sinais em sistemas de transmissão de alta frequência (ANDRADE, 2022).

A aplicação dos métodos de linha de transmissão pode variar desde a análise detalhada de um cabo coaxial em um laboratório até o projeto de sistemas de comunicação complexos, como antenas de satélite e sistemas de transmissão de micro-ondas. Portanto, o conhecimento e a compreensão desses métodos são muito relevantes para os profissionais da área de micro-ondas e comunicações que trabalham no desenvolvimento de tecnologias sem fio e sistemas de telecomunicações.

O método de guia de ondas WR-90, feito de forma simulada neste trabalho, é uma técnica específica relacionada a guias de onda retangulares com dimensões padronizadas que seguem os parâmetros estabelecidos pela IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos). Nesse contexto, guias de onda são estruturas que direcionam e propagam ondas eletromagnéticas dentro de um espaço restrito.

O guia de ondas WR-90 tem dimensões específicas que se adequam a uma faixa de frequência na região das micro-ondas. Essa faixa é conhecida por ser utilizada em comunicações via satélite, radar e muitas outras aplicações. Abaixo é apresentado a tela do software Ansys HFSS o guia de ondas sendo simulado de forma tridimensional.

Figura 3.2: Tela da Simulação no software Ansys HFSS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6 Uso de MatLab na Análise de Dados

No âmbito deste estudo, a análise de dados desempenhou um papel importante na interpretação das simulações realizadas. Para isso, foi empregada a versátil plataforma computacional MATLAB, que ofereceu as ferramentas necessárias para a análise detalhada dos resultados obtidos. O MATLAB é uma poderosa linguagem de programação e ambiente de desenvolvimento que se destaca por sua capacidade de lidar com dados numéricos, gráficos e análises complexas.

Com o intuito de viabilizar a compreensão dos resultados das simulações de radomes, foi desenvolvido um código específico no MATLAB. Esse código permitiu a importação e processamento dos dados brutos, bem como a criação de gráficos que evidenciaram as relações entre as variáveis analisadas. A utilização deste software foi fundamental para a análise quantitativa e qualitativa dos resultados, possibilitando a visualização clara e aprofundada das informações.

O código desenvolvido extraiu as informações necessárias dos dados, permitindo a comparação dos materiais testados em termos de sua eficácia como radomes. Os gráficos gerados a partir dos dados brutos auxiliaram na interpretação dos resultados e na visualização das tendências. Na figura apresenta-se o código utilizado para geração dos gráficos:

Figura 3.3 – Código de análise dos resultados.

```

1  % Carregar o arquivo CSV usando readmatrix
2  data = dlmread('seuarquivo.csv'); % Substitua 'seuarquivo.csv' pelo nome do seu arquivo
3
4  % Separar as colunas
5  frequencia_GHz = data(:, 1); % Coluna da frequência em GHz
6  potencia_passante = data(:, 2); % Coluna da potência passante
7  potencia_refletida = data(:, 3); % Coluna da potência refletida
8
9  % Criar um gráfico
10 figure;
11 plot(frequencia_GHz, potencia_passante, 'b', 'LineWidth', 2); % Potência passante em azul
12 hold on; % Para manter o mesmo gráfico
13 plot(frequencia_GHz, potencia_refletida, 'r', 'LineWidth', 2); % Potência refletida em vermelho
14 xlabel('Frequência (GHz)');
15 ylabel('Potência (dB)');
16 title('Simulação - Material'); % Título do Gráfico
17 legend('Potência Refletida', 'Potência Passante');
18 grid on; % Adicionar grade ao gráfico

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

Na seção de análise de resultados deste estudo, serão explorados os dados obtidos por meio das simulações realizadas com o intuito de avaliar a transparência eletromagnética de quatro materiais (alumina, TC250, acrílico e teflon) distintos, quando submetidos à faixa de frequência da banda X. Nesse contexto, a transparência eletromagnética de um material é uma característica fundamental, pois está intrinsecamente ligada, como foi visto, ao seu desempenho na construção de radomes.

As simulações conduzidas desempenham um papel essencial neste estudo, uma vez que possibilitam a avaliação detalhada do comportamento dos materiais em relação à propagação de ondas eletromagnéticas nesta faixa, utilizada em aplicações de comunicação e defesa em meio naval. A escolha dos materiais é de extrema relevância, pois determinará a eficácia dos radomes, que devem garantir a integridade e o desempenho das antenas.

Cada um dos materiais utilizados nas simulações representa uma potencial alternativa para a construção de radomes. A análise visa identificar qual deles demonstra uma maior transparência eletromagnética nessa faixa de frequência crítica, permitindo que sinais de micro-ondas atravessem o radome com eficiência, sem sofrer reflexões significativas. Além disso, foi esclarecido como a natureza do material influencia o comportamento das ondas eletromagnéticas e, conseqüentemente, o desempenho do radome na proteção das antenas em meios navais.

Os resultados dessa análise não apenas contribuirão para uma compreensão mais aprofundada da interação entre materiais e ondas eletromagnéticas na banda em questão, mas também fornecerão informações valiosas para o projeto e a seleção de materiais ideais na construção de radomes eficazes em aplicações navais. A importância desses resultados é evidente, uma vez que essas estruturas desempenham um papel fundamental na integridade dos sistemas de comunicação e radares utilizados em operações marítimas, onde desafios e intempéries representam constantes ameaças.

### **4.1 Simulação Eletromagnética Tridimensional**

Para realizar essa análise, foi utilizado o software de simulação Ansys® HFSS™, uma poderosa ferramenta que permite modelar e avaliar a interação entre estruturas eletromagnéticas e materiais dielétricos em uma ampla gama de frequências. Especificamente,

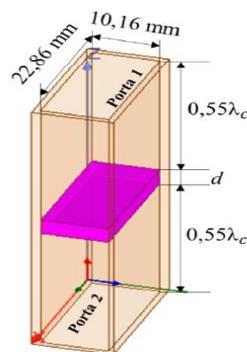
o software auxiliará a compreender como os materiais em estudo se comportam quando expostos à banda X.

A configuração experimental será estabelecida dentro de um guia de ondas WR-90 simulado, que é uma estrutura muito relevante para o estudo em questão. Um guia de ondas é um dispositivo utilizado em engenharia eletromagnética que direciona e propaga ondas eletromagnéticas em sua estrutura. No caso do guia de ondas WR-90, ele é especificamente projetado para operar na faixa de frequência que abrange de 8 a 12 GHz. Isso o torna particularmente relevante, uma vez que essa faixa é amplamente utilizada em comunicações, radares e outras aplicações de defesa, especialmente em ambientes navais.

A espessura do radome desempenha um papel importante na capacidade de transmitir ondas eletromagnéticas com eficiência. Se o radome for muito espesso, isso pode afetar negativamente sua transparência, resultando em perdas de sinal e redução do desempenho das antenas. Por outro lado, um radome com espessura adequada e propriedades mecânicas bem equilibradas é essencial para manter a integridade estrutural e a proteção das antenas.

Para garantir a precisão das simulações, foi adotada uma distância de  $0,55\lambda_c$  entre as portas de entrada (Porta 1) e de saída (Porta 2) do guia de ondas WR-90 e o ponto onde o material compósito laminado será colocado. Essa distância foi cuidadosamente escolhida com o propósito de evitar efeitos de transientes e pontos de singularidade, o que poderia afetar a qualidade dos resultados. Levando em consideração que a velocidade da luz no vácuo é aproximadamente 299.792.458 metros por segundo ( $c$ ), foi calculado que o valor de  $\lambda_c$  (comprimento de onda de corte) para o guia de ondas WR-90 é de aproximadamente 45,72 mm. Portanto, a posição da amostra foi definida com um afastamento de aproximadamente 25,15 mm em relação às portas 1 e 2 do guia de ondas WR-90. A figura abaixo ilustra como foi modelado este guia de onda no software.

Figura 4.1 – Layout de Simulação do guia de ondas WR-90.



Fonte: (ANDRADE, 2022).

A espessura da amostra (d) utilizada foi de 2 milímetros (mm), como preconizado pelo IEEE para esta banda. Com essa medida precisa é possível apresentar resultados confiáveis e relevantes para a análise da transparência eletromagnética do material compósito laminado nessa banda de frequência específica.

Esses parâmetros e configurações são essenciais para as simulações, pois garantem que os resultados obtidos sejam relevantes e representativos do comportamento dos materiais na banda X, um cenário frequentemente encontrado em aplicações navais. A escolha do guia de ondas WR-90 e a precisão na disposição da amostra garantem que as simulações sejam confiáveis e capazes de fornecer informações valiosas para a análise da transparência eletromagnética dos materiais compostos laminados nesta faixa crítica de frequência. Dessa forma, foi possível identificar qual material se destaca como a escolha ideal para a construção de radomes eficazes em cenários navais desafiadores.

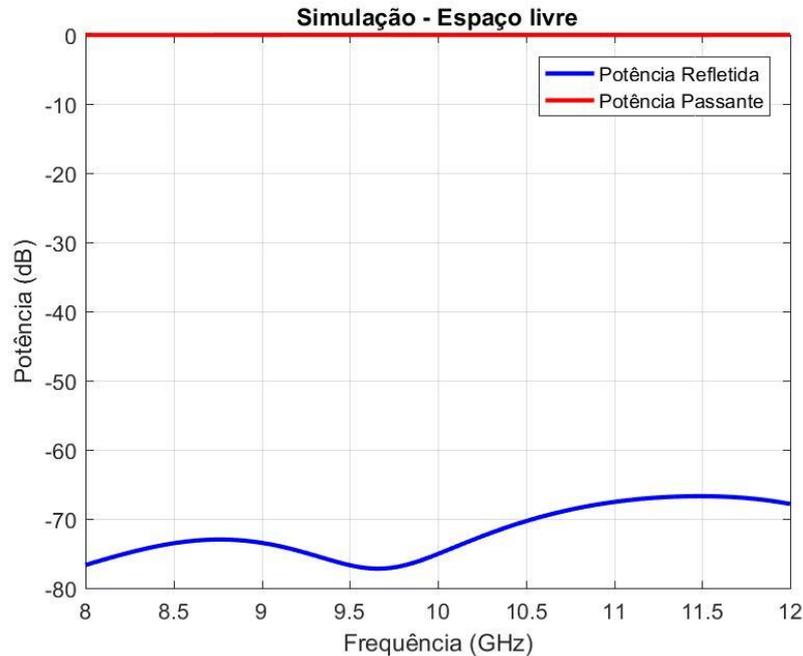
## **4.2 Análise da transparência dos materiais na banda X**

Para estabelecer um ponto de referência, a primeira simulação utilizou os parâmetros no caso da onda eletromagnética se deslocando no espaço livre. As propriedades dielétricas do ar podem ser aproximadas por valores típicos. A permissividade dielétrica nessa faixa de frequência é próxima de 1 ( $\epsilon \approx 1$ ), o que indica que o ar tem uma capacidade dielétrica quase igual à do vácuo. Além disso, a tangente de perdas para o ar na banda X é muito próxima de zero. Isso significa que o ar apresenta perdas extremamente baixas nessa faixa de frequência.

Esses valores típicos são adequados para a maioria das simulações e análises iniciais, mas é importante lembrar que as propriedades do ar podem variar ligeiramente com fatores como temperatura, pressão atmosférica e umidade. Portanto, para simulações que exigem uma precisão absoluta, é aconselhável consultar fontes confiáveis ou tabelas que forneçam dados mais detalhados da permissividade e da tangente de perdas nesta faixa de frequência.

Os resultados da simulação mostraram que, ao passar por essa configuração, o sinal eletromagnético manteve a potência de passagem quase inalterada, com uma atenuação mínima, na ordem de 0 dB. Isso, evidentemente, indica que o ar apresentou uma transparência nessa banda de frequência, com pouca reflexão. A figura 4.2 mostra o resultado gerado pelo software MatLab. Nele é apresentado a Potência Passante e a Potência Refletida pela amostra.

Figura 4.2 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética no espaço livre.



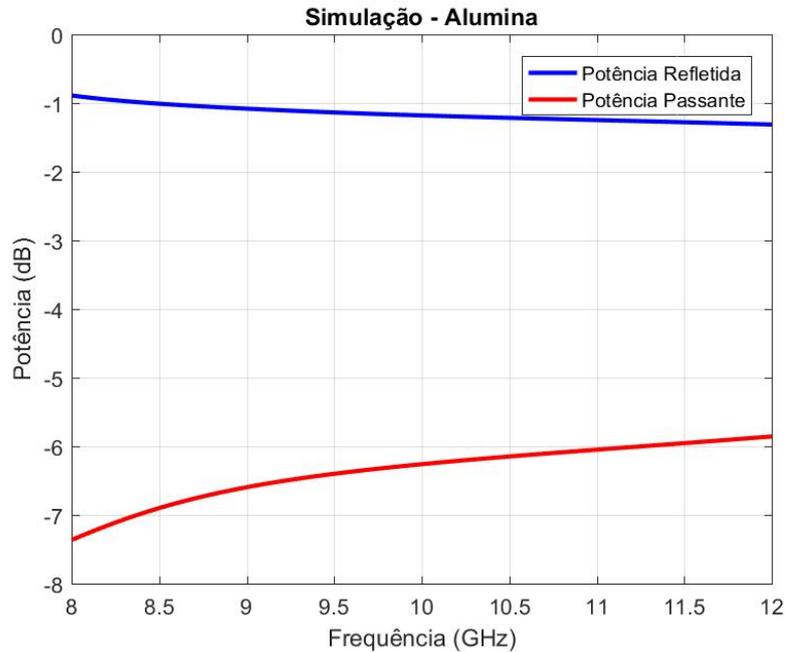
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A alumina é um material cerâmico conhecido por suas propriedades dielétricas. Na banda estudada, a permissividade dielétrica da alumina ( $\epsilon$ ) é tipicamente em torno de 9, o que a torna um material dielétrico com alta constante dielétrica. No entanto, a tangente de perdas da alumina na mesma faixa de frequência é geralmente baixa, o que significa que suas perdas dielétricas são relativamente pequenas.

Os resultados da simulação que utilizou alumina como material dielétrico mostraram que a potência refletida foi maior que a potência transmitida. A alta constante dielétrica da alumina leva a uma maior reflexão das ondas e a uma menor capacidade de passagem em comparação com o ar. Isso é consistente com as propriedades dielétricas da alumina, que resultam em maior reflexão e atenuação do sinal. A figura 4.3 mostra o resultado da simulação.

Portanto, os resultados sugerem que a alumina pode não ser o material ideal para a construção de radomes. Em cenários em que a minimização das perdas e da reflexão do sinal é fundamental, outros materiais dielétricos com propriedades mais adequadas para a banda X podem ser mais apropriados. Os valores específicos da permissividade e da tangente de perdas da alumina nesta faixa de frequência podem variar ligeiramente, portanto, ajustes precisos dos valores das propriedades dielétricas podem ser necessários em simulações mais detalhadas.

Figura 4.3 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética da Alumina.



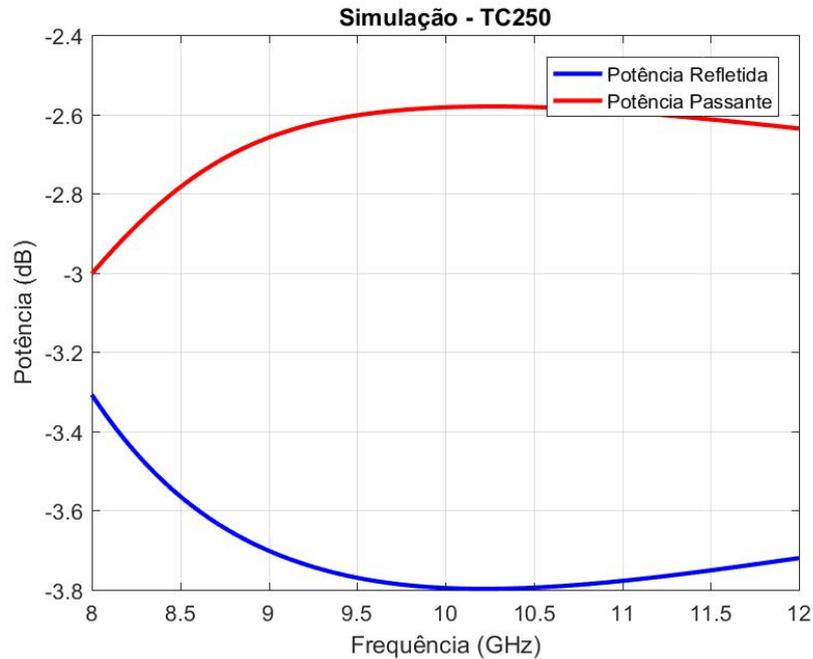
Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo material utilizado foi o TC250, um material compósito que possui propriedades dielétricas notáveis e é amplamente utilizado em aplicações de engenharia e comunicação devido à sua combinação única de características. O TC250 é uma resina epóxi reforçada com fibra de vidro, o que lhe confere uma boa resistência mecânica e rigidez, tornando-o adequado para aplicações estruturais. Além disso, ele apresenta excelentes propriedades elétricas, incluindo uma permissividade relativamente alta e uma baixa tangente de perdas.

Possuindo uma permissividade relativa de aproximadamente 4,3 e uma tangente de perdas em torno de 0,001, o TC250 demonstrou resultados notáveis. Durante as simulações, verificou-se que o TC250 proporcionou uma potência passante média que variou entre -2,6 e 3,0 dB. Esses resultados sugerem que o TC250 é um material dielétrico que permite a passagem de ondas eletromagnéticas com uma atenuação relativamente baixa. A figura 4.4 mostra esse resultado.

Essas características do TC250 indicam que ele é uma opção promissora para a construção de radomes, já que apresentou menor reflexão e um equilíbrio razoável entre a potência passante e refletida na banda X.

Figura 4.4 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética do TC250.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora tenha demonstrado características promissoras em termos de transparência na banda X, também apresentou uma taxa relativamente alta de reflexão, com valores variando entre -3,3 dB e -3,8 dB. Essa reflexão de sinal pode indicar uma parte da energia eletromagnética que é refletida de volta para o ambiente, em vez de ser transmitida através do radome.

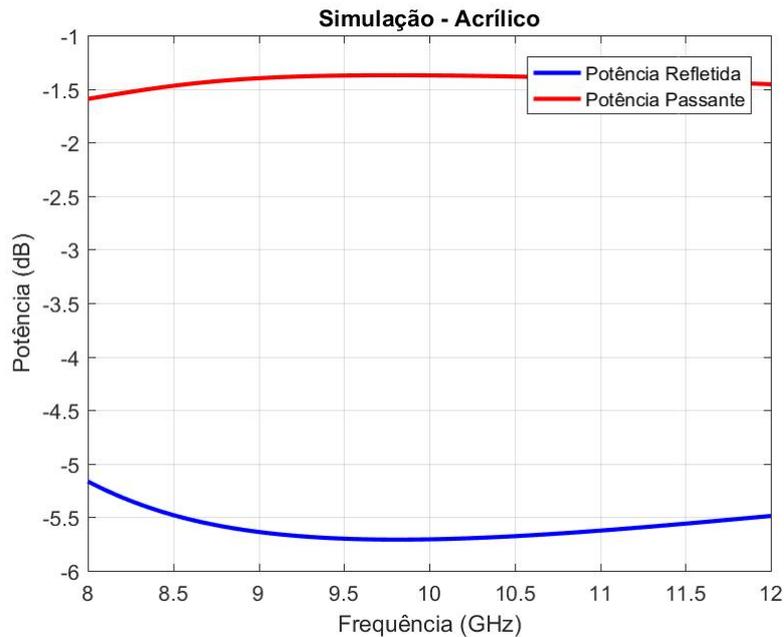
Essa reflexão pode ser resultado de variações nas propriedades do material ou em sua espessura, que podem afetar a eficiência da transmissão e a capacidade do radome de atenuar os sinais refletidos. Portanto, o TC 250, embora seja um material com potencial, pode exigir otimizações adicionais em seu design ou na aplicação de revestimentos especiais para reduzir ainda mais a reflexão e melhorar sua transparência na banda X.

Essa característica ressalta a importância de considerar cuidadosamente as propriedades do material, a espessura do radome e outros fatores no processo de *design*, a fim de alcançar os melhores resultados em termos de transparência eletromagnética e eficiência de proteção das antenas.

O Polimetilmetacrilato, frequentemente conhecido como acrílico, é um material polimérico transparente que possui uma ampla gama de aplicações devido às suas propriedades ópticas e dielétricas. Esse material é comumente utilizado em aplicações que requerem alta transparência, como em painéis de exibição, janelas, e em algumas aplicações de radomes.

Nas simulações, o acrílico mostrou uma potência passante de aproximadamente -1,5 dB na banda X, o que indica uma boa capacidade de transmitir ondas eletromagnéticas com baixa atenuação. As propriedades dielétricas do acrílico incluem uma permissividade relativamente baixa e uma tangente de perdas também em níveis aceitáveis. A figura abaixo apresenta o resultado.

Figura 4.5 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética do Acrílico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O último material simulado, o Teflon, conhecido também por politetrafluoretileno (PTFE), é um material polimérico amplamente utilizado na indústria devido às suas notáveis propriedades elétricas e mecânicas. Pertence à família dos fluoropolímeros e é conhecido por sua alta resistência química, baixa absorção de umidade e excelente estabilidade térmica.

Uma das características mais notáveis do Teflon em relação à sua aplicação em radomes é a sua baixa permissividade relativa, que indica sua capacidade de permitir a passagem eficiente de ondas eletromagnéticas. A permissividade do Teflon é de aproximadamente 2,1, o que é bastante próximo da do vácuo (permissividade relativa igual a 1), tornando-o um material dielétrico altamente transparente a faixa de frequências estudada.

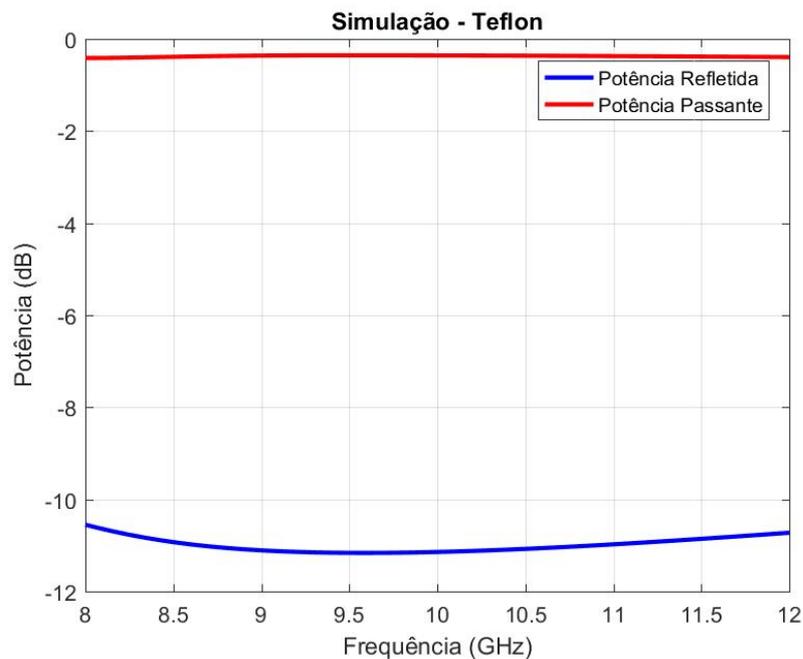
Além disso, o Teflon possui uma tangente de perdas extremamente baixa, geralmente na ordem de 0,0001 na banda X. Isso significa que ele absorve uma quantidade mínima de energia eletromagnética e reflete uma quantidade igualmente baixa, tornando-o um

material excepcionalmente eficaz na minimização das perdas e da distorção das ondas de radiofrequência.

Essas propriedades tornam o Teflon uma escolha favorável na fabricação de radomes, uma vez que mantém a integridade das ondas eletromagnéticas, permitindo que elas atravessem o material quase sem perda de potência. Isso é essencial para as antenas e sistemas de radar, uma vez que a eficiência de transmissão e recepção depende da transparência eletromagnética do material do radome.

Os resultados da simulação indicam que a potência passante para o Teflon ficou próxima de 0 dB, o que sugere que esse material possui excelente transparência a banda estudada, como aparece na figura 4.6. Isso se deve à sua baixa tangente de perdas, que minimiza a absorção e a reflexão de ondas eletromagnéticas, tornando-o uma escolha preferencial para radomes em sistemas de comunicação e radar.

Figura 4.6 – Gráfico resultante da simulação eletromagnética do Teflon.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Concluindo, este trabalho teve como propósito explorar o vasto campo dos radomes e sua aplicação no contexto marítimo. Uma análise histórica foi realizada, remontando ao surgimento da necessidade de proteger radares e transmissores contra elementos externos, revelando o desenvolvimento contínuo dessas estruturas. Além disso, o estudo investigou os desafios enfrentados no cenário marítimo, que podem afetar adversamente equipamentos expostos, enfatizando a importância dos radomes na proteção e eficácia operacional. Foi destacada a influência do ambiente marítimo, abordando aspectos como corrosão, umidade e exposição solar.

A análise das características de design de radomes, incluindo materiais dielétricos e geometria, ofereceu informações valiosas sobre como essas estruturas podem fornecer proteção sem prejudicar o desempenho das antenas. A alta refletividade dos materiais pode prejudicar a qualidade das comunicações e a integridade dos sistemas eletrônicos, ressaltando a necessidade de selecionar materiais que minimizem a perda de sinal e a refletividade.

Foi realizado uma análise abrangente e detalhada sobre a transparência eletromagnética de diferentes materiais de radomes na banda X, com foco nas aplicações de comunicações navais. Ao longo deste estudo, foram conduzidas simulações para avaliar o desempenho desses materiais, considerando suas permissividades elétricas e tangentes de perdas. Essa pesquisa proporcionou resultados valiosos sobre a eficácia dos radomes em ambientes marítimos.

Primeiramente, as simulações demonstraram que a escolha do material de radome é um fator crítico na garantia da transparência eletromagnética das antenas. A alumina, por exemplo, mostrou alta reflexão em comparação com os outros materiais, o que a torna menos apropriada para aplicações em que a perda de sinal é indesejável. Por outro lado, o teflon exibiu excelente transparência, refletindo a importância da seleção adequada do material para otimizar o desempenho da antena.

A análise também ressaltou que a permissividade elétrica e a tangente de perdas desempenham papéis fundamentais na resposta de cada material. Em frequências mais altas, as características elétricas dos materiais têm um impacto significativo na transparência eletromagnética e na atenuação do sinal. Portanto, a escolha de materiais com as propriedades corretas é importante para maximizar a eficiência do sistema de comunicação naval.

Os resultados também apontaram para uma conclusão importante: o desenvolvimento de materiais mais avançados e aprimorados, especialmente aqueles com

permissividades elétricas e tangentes de perdas otimizadas, pode resultar em radomes mais eficientes e capazes de garantir uma comunicação naval mais confiável.

Em resumo, este trabalho contribui para o entendimento aprofundado das características elétricas dos materiais utilizados na confecção de radomes e seu impacto nas comunicações navais. Os resultados fornecem uma base sólida para futuras pesquisas na área de proteção de antenas em ambientes marítimos e apontam para a importância de desenvolver materiais inovadores para otimizar o desempenho dos radomes e garantir a confiabilidade das comunicações em cenários desafiadores.

## **5.1 Considerações Finais**

Nas considerações finais deste estudo, é possível destacar a relevância de uma escolha criteriosa dos materiais de radomes em aplicações de comunicações e radares marítimos. As simulações realizadas forneceram uma visão aprofundada das características elétricas desses materiais, destacando a necessidade de considerar fatores como permissividade elétrica e tangente de perdas na seleção dos materiais ideais para proteger antenas em ambientes marítimos.

Ficou claro que a escolha adequada do material desempenha um papel fundamental na manutenção da transparência eletromagnética, evitando perdas de sinal indesejadas e interferências nas comunicações. Os resultados demonstraram que materiais como o teflon se destacam pela capacidade de minimizar a reflexão e maximizar a eficiência do sistema.

Além disso, a pesquisa enfatizou a necessidade contínua de inovação e desenvolvimento de materiais com propriedades elétricas otimizadas para a banda X. Isso pode levar a radomes mais eficazes, capazes de garantir uma comunicação naval confiável mesmo em ambientes marítimos desafiadores.

Por fim, o estudo ressaltou a importância de considerar as características elétricas dos materiais em conjunto com o ambiente operacional ao escolher os radomes mais adequados. Essa abordagem pode contribuir para o aprimoramento da confiabilidade das comunicações navais, permitindo que as antenas funcionem de forma eficaz em ambientes sujeitos a intempéries.

Em síntese, este trabalho oferece uma visão valiosa sobre os aspectos críticos da escolha de materiais de radomes para aplicações navais e destaca a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nessa área. A compreensão das características elétricas dos

materiais é essencial para aprimorar o desempenho das antenas e garantir comunicações confiáveis em cenários desafiadores.

## 5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo em Escalas Maiores e Ambientes Reais: Uma extensão promissora deste estudo envolve a realização de simulações em escalas maiores e em ambientes de campo real. Isso permitiria validar os resultados das simulações em condições práticas e considerar aspectos que não podem ser totalmente modelados em ambientes controlados;
- Investigação de Materiais Alternativos: Explorar outros materiais dielétricos e condutores para a construção de radomes é uma área rica em possibilidades. Estudar materiais menos convencionais, como compósitos avançados, pode levar a avanços significativos na eficácia dos radomes;
- Análise de Faixas de Frequência Adicionais: O estudo atual concentrou-se na banda X, mas o desempenho dos radomes pode variar em diferentes faixas de frequência. Investigar o comportamento em outras faixas, como banda Ku ou Ka, seria uma extensão valiosa deste trabalho;
- Otimização de Geometrias e Design de Radomes: A otimização das geometrias e designs dos radomes, levando em consideração múltiplos fatores, como frequência, espessura, formato e materiais, é uma área de pesquisa que pode aprimorar ainda mais a eficácia dos radomes; e
- Desenvolvimento de Radomes Inteligentes: A pesquisa em radomes inteligentes, que podem se adaptar dinamicamente às mudanças nas condições climáticas, é uma direção inovadora. Isso envolveria o uso de materiais avançados e tecnologias de controle.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F. D. O. **Caracterização de compósitos dielétricos utilizados em radomes de banda larga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Telecomunicações) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2022.
- CADY, W. M.; KARELITZ, M. B.; TURNER, L. A. **Radar Scanners and Radomes**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1948.
- CORY, T. N. Hot Pressed Silicon Nitride. **Proceedings of the 11th Symposium**, Atlanta, 1972.
- GRAAN. **Estratégia Global**, 2015. Disponível em: <<https://estrategiaglobal.blog.br/2015/02/instituto-de-pesquisas-da-marinha-desenvolve-novo-mage-para-as-corvetas-tamandare.html>>. Acesso em: 20 Julho 2023.
- HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 10<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 3, 2016.
- KEYSIGHT. **Application Note - Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials**. [S.l.]: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>>. Acesso em: 19 Outubro 2023.
- KOZAKOFF, D. J. **Analysis of Radome-Enclosed Antennas**. 2<sup>a</sup>. ed. Norwood: Artech House, 2009.
- LIU, H.-N. Design of Antenna Radome Composed of Metamaterials for High. **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006**, Taiwan, 14 Novembro 2006. 19-22.
- M. BASKOV, K.; A. POLITIKO; N. SEMENENKO. Increase in the Level of Antenna Side Radiation due. **IEEE**, Moscou, 25 Novembro 2020. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/348366654\\_Increase\\_in\\_the\\_Level\\_of\\_Antenna\\_Side\\_Radiation\\_due\\_to\\_a\\_Radome\\_as\\_a\\_Radiotechnical\\_Characteristic](https://www.researchgate.net/publication/348366654_Increase_in_the_Level_of_Antenna_Side_Radiation_due_to_a_Radome_as_a_Radiotechnical_Characteristic)>.

METZ, C. Phased Array Metamaterial Antenna System. **U.S. Patent**, Outubro 2005. Disponível em: <<https://spie.org/documents/Newsroom/PDF/NERAC-0607/US06958729B1.pdf>>. Acesso em: 10 Outubro 2023.

PADILHA, L. **Defesa Aérea & Naval**, 2021. Disponível em: <<https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/fragata-tamandare-lace-entrega-o-prototipo-qualificado-da-unidade-de-antenas-do-mage-defensor>>. Acesso em: 10 Outubro 2023.

PURINTON, D. L. Radome Wire Grid Having Low Pass Frequency Characteristics. **U.S. Patent**, 1976.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SHAVIT, R. **Radome Electromagnetic Theory and Design**. Hoboken: Wiley, 2018.

SKOLNIK, M. I. **Radar Handbook**. 3<sup>a</sup>. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.

WOLFF, C. Radar Tutorial. **Radar Tutorial**. Disponível em: <<https://www.radartutorial.eu/19.kartei/07.naval/karte093.pt.html>>. Acesso em: 10 Junho 2023.