

**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

**EMPREGO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS NOS MEIOS
NAVAIS**



FLAVIO AGABEL JUNIOR

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE FLAVIO AGABEL JUNIOR

EMPREGO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS NOS MEIOS
NAVAIS

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

Orientadores:

Roberto da Cosa Lima, DSc – IPqM

Beatriz Alencar MSc – CIAA

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE FLAVIO AGABEL JUNIOR
EMPREGO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS NOS MEIOS
NAVAIS

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

Aprovada em 24 de novembro de 2023

Banca Examinadora:

Roberto da Cosa Lima, DSc – IPqM

Beatriz Alencar MSc– CIAA

Vitor Fernando de Melo Gonçalves, MSc – ITA



Dedico este projeto à minha noiva, cujo apoio tem sido constante, não apenas durante este período desafiador, mas ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Ofereço este trabalho como um símbolo não apenas do meu esforço, mas também do nosso compromisso e dedicação ao futuro que construímos juntos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus estimados orientadores, o respeitado Dr. Roberto e a excepcional Professora Beatriz Alencar, cuja dedicação, insights e orientações diretas foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. O Dr. Roberto, em especial, demonstrou uma disponibilidade notável ao atender prontamente minhas solicitações, fornecendo suporte valioso e recursos adicionais que enriqueceram sobremaneira o conteúdo deste trabalho.

Não posso deixar de reconhecer a contribuição fundamental dos meus amigos do Curso de Aperfeiçoamento Avançado de Guerra Eletrônica, mais especificamente ao 1T Timothy, 1T Villander, 1T Toshio e 1T Roberto, cuja camaradagem e solidariedade tornaram essa jornada muito mais leve e suportável. A atmosfera de colaboração e união da turma desempenhou um papel essencial durante as exigentes semanas de prova e nos inúmeros trabalhos que enfrentamos juntos.

Gostaria também de expressar minha sincera gratidão ao Prof. Guilherme e ao CT Sathler, cuja prontidão em atender às demandas da turma de Guerra Eletrônica e a contínua disposição em ajudar foram fundamentais para garantir uma experiência enriquecedora e uma jornada acadêmica mais gratificante.

Por fim, minha imensa gratidão se estende a toda minha família, cujo apoio incondicional e presença constante foram essenciais em minha jornada pessoal e profissional. Aos meus queridos pais Flavio Agabel e Margareth Agabel que foram a base sólida sobre a qual construí minha trajetória, sou imensamente grato por sua orientação e apoio inabalável. A minha amada Noiva Thamyres, cujo apoio e companheirismo têm sido a força motriz por trás de minhas conquistas, sou imensamente grato por seu amor e encorajamento contínuos.

"Tenha coragem! Eu venci o mundo."
Jesus Cristo

EMPREGO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE MICRO-ONDAS NOS MEIOS NAVAIS

RESUMO

Este trabalho explora o avanço e a progressão da tecnologia stealth em meios navais militares, sublinhando a necessidade de reduzir a Seção Reta Radar (SRR) para o aumento da furtividade destas embarcações. Uma investigação detalhada sobre a criação e a aplicação de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) é realizada, destacando sua importância na minimização da detecção por radar. A importância da SRR é examinada em relação à sua influência na detecção por radar, enquanto a utilidade da furtividade em navios é analisada em termos de fortalecimento da capacidade de sobrevivência em situações de combate e no aprimoramento de operações de reconhecimento e ataque. A geometria dos acessórios e da plataforma de superfície é discutida como um componente fundamental na redução da SRR. Uma avaliação prática é conduzida utilizando-se do material, aqui intitulado Ferrita, para investigar sua eficácia em termos da absorção da onda eletromagnética incidente. Os resultados indicam a habilidade do material compósito em reduzir a detecção por radar, pois este absorve radiação eletromagnética na faixa de frequência entre 8,2 a 12,4 GHz (banda X), chegando a absorver mais de 99% da onda eletromagnética incidente próximo a 10 GHz, destacando a importância do emprego de tecnologias stealth inovadoras em embarcações navais militares para aprimorar sua capacidade de sobrevivência e sigilo, durante operações táticas e estratégicas

Palavras- chave: Tecnologia stealth, Furtividade, Seção Reta Radar (SRR), Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – U- Early images of the U-2 spy aircraft being tested at Area 51.....	22
Figura 2.2 – Sea Shadow (IX-529) - Protótipo de navio furtivo desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos	27
Figura 2.3 –Primeira navegação futura do USS Zumwalt no mar.....	28
Figura 2.4 – Feixes RADAR em forma de leque	31
Figura 2.5 –Medição da SRR em campo aberto	34
Figura 2.6 –Expressões de SRR para geometrias elementares simples	35
Figura 2.7 –Exemplo de funcionamento de uma MARE.....	41
Figura 2.8 –Câmara Anecóica do Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM)	41
Figura 2.9– Terminologia associada a materiais carbonosos porosos	42
Figura 4.1 –Isolamento fornecido por superfície de metas entre conjuntos de antenas.....	49
Figura 4.2 – Adaptação do estudo de aplicação do stealth para uma típica Fragata ou Destroyer	50
Figura 4.3 – Type-022 é claramente visível nas imagens de satélite de Radar de Abertura Sintética.....	51
Figura 4.4 – Navio USS Zumwalt (DDG-1000) em modelo 3D	52
Figura 4.5 – Plataformas expostas do USS Zumwalt (DDG-1000).....	53
Figura 4.6 – Projeto do submarino A-26.....	53
Figura 4.7 – Superfície do costado do USS Zumwalt (DDG-1000).....	54
Figura 4.8 – Uma das Superfície facetadas do USS Zumwalt (DDG-1000)	55
Figura 4.9 – Superfície esférica do USS Zumwalt (DDG-1000)	55
Figura 4.10 – Hangar do USS Zumwalt (DDG-1000).....	56
Figura 4.11 – Propulsão a Hidrojato da Corveta Visby	57
Figura 5.1 – Analisador Vetorial de Rede (N5232A 300kHz to 20 GHz PNA-L network analyser) da Keysight	60
Figura 5.2 – Porta amostra.....	61
Figura 6.1 – Tintas e placas absorventes de radiação eletromagnéticas desenvolvidas pelo IPqM	64
Figura A.1 – Esquema do experimento de um radar quântico.....	79

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASDIC	<i>Anti Submarine Development Interalee Comitee</i>
AVIC	<i>Aviation Industry Corporation of China</i>
BSA	<i>Battlefield Surveillance Aircraft</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CME	Contra-medida Eletrônica
CTEX	Centro Tecnológico do Exército
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DEN	Diretoria de Engenharia Naval
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FMV	<i>Försvarets Materielverk</i>
FTD	<i>Foreign Technology Division</i>
GA-ASI	<i>General Atomics Aeronautical Systems</i>
GE	Guerra Eletrônica
IpqM	Instituto de Pesquisa da Marinha
IR	<i>Infrared</i>
MANSUP	Míssil Antinavio Nacional de Superfície
MAP	<i>Military Assistance Program</i>
MARE	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
MB	Marinha do Brasil
NAPaOc	Navio Patrulha Oceânico
NBS	<i>Naval Studies Board</i>
NRL	<i>Naval Research Laboratories</i>
OM	Organização Militar
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento

POGO	<i>Project On Government Oversight</i>
PPI	<i>Plan Position Indicator</i>
RADAR	<i>Radio Detection Rangement</i>
RAM	<i>Radar-absorbing Material</i>
SRR	Seção Reta Radar
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
USAF	<i>U.S. Air Force</i>
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i>

LISTAS DE SÍMBOLOS

c	velocidade da luz
τ	tempo de duração do pulso
ΔR	resolução em distância
D	diretividade
I_{iso}	Intensidade radiante
P	potência transmitida/ irradiada
(θ_B, φ_B)	direção/ ângulo de irradiação da antena
π	constante matemática com valor aproximado de 3,1415
G	ganho da antena do radar
A_{eff}	área efetiva
λ	comprimento da onda
N	ruído na entrada
k	constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ W/(Hz.°K))
T	temperatura padrão (290K)
B	largura de banda
F	figura de ruído do receptor radar
S	potência do sinal do eco
R	potência de ruído no receptor
σ	seção reta do alvo
R	distância do alvo
L	perdas
P_r	potência re-irradiada
p_r	potência refletida pelo alvo
Z_0	impedância (377 Ohms)

μ_0 permeabilidade do vácuo

ϵ_0 constante dielétrica do vácuo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Apresentação do Problema	17
1.2 Justificativa e Relevância	19
1.3 Objetivos.....	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 A gênese da furtividade	22
2.2 Preceitos para a furtividade	29
2.2.1 Conceitos Iniciais do RADAR	29
2.2.2 A detecção de um alvo.....	30
2.2.3 Características da reflexão.....	33
2.2.4 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética	36
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 Classificação da Pesquisa	39
3.1.1 Quanto aos fins	39
3.1.2 Quanto aos meios.....	39
3.2 Limitações do Método	40
3.3 Coleta e Tratamento de Dados.....	40
4 O USO DA FURTIVIDADE NOS MEIOS DE SUPERFÍCIE.....	41
4.2 Aplicação da furtividade nos meios de superfície	44
4.3 Vantagens e Limitações do uso da furtividade em navios.....	52
5 CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FERRITA-POLICLOROPRENO COM ALTO TEOR DE ABSORÇÃO DE MICRO-ONDAS.	53
5.1 Propriedades Eletromagnéticas do Compósito	54
5.1.1 Permissividade complexa na banda X	54
5.1.2 Permeabilidade complexa na banda X.....	55
5.1.3 Medida de Refletividade do Compósito	56
6 SITUAÇÃO ATUAL	57

7 CONCLUSÃO	59
7.1 Considerações Finais	59
7.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	60
8 REFERÊNCIAS	62
9 GLOSSÁRIO	73
10 APÊNDICE	74
11 ANEXO A – Tabela de SRR	76
12 ANEXO B – Tabela de Bandas	77

1 INTRODUÇÃO

Na era contemporânea, onde a evolução tecnológica avança a passos largos, a busca pela supremacia militar é incessante. A constante inovação de armas estratégicas desencadeia uma corrida armamentista interminável, pois o sucesso dessas tecnologias inovadoras se traduz em superioridade e maior capacidade coercitiva para as nações que as dominam (Spalding, 2019).

Em um cenário de guerra, a eficácia de um meio militar está intrinsecamente ligada à sua capacidade de ser veloz, de causar impacto destrutivo e, crucialmente, de permanecer imperceptível aos olhos e radares inimigos. A premissa fundamental é clara: a melhor maneira de evitar uma resposta perigosa é evitar ser detectado em primeiro lugar. Nesse contexto, uma nova fronteira tecnológica emergiu, baseada no estudo aprofundado de materiais e geometrias estruturais capazes de minimizar a Seção Reta Radar (SRR) de uma plataforma militar. Essa abordagem deu origem à técnica furtiva, também conhecida como tecnologia Stealth (Spalding, 2019).

No entanto, o emprego dessas tecnologias não se restringe apenas ao domínio terrestre e aéreo. Em um mundo onde as Marinhas de guerra desempenham um papel vital na defesa dos interesses nacionais e na manutenção da soberania, a aplicação de materiais absorvedores de micro-ondas nos meios navais se torna uma área de estudo crítica (Spalding, 2019).

Este trabalho busca explorar os fundamentos, as aplicações e os desafios associados ao uso de tecnologias stealth em contextos navais, destacando o potencial dessa abordagem para fortalecer a defesa e a segurança das nações em um mundo cada vez mais complexo e tecnologicamente avançado. Assim, a integração de tecnologias stealth nos meios navais se torna não apenas uma necessidade estratégica, mas também uma parte essencial da busca contínua pela supremacia militar em um cenário global dinâmico e desafiador (Spalding, 2019).

1.1 Apresentação do Problema

Conforme analisado pelo Commodore Samir Advani (Retd) no artigo publicado na edição de janeiro de 2019 da revista SPS Naval Forces, as crescentes complexidades das operações no cenário marítimo estão introduzindo novos desafios para as marinhas em todo o mundo. A crescente ênfase no desenvolvimento de tecnologias para a Guerra Eletrônica tem reduzido a probabilidade de confrontos navais diretos entre adversários, em parte devido aos custos cada vez mais altos e, muitas vezes, proibitivos, das armas modernas. Essa mudança de cenário tem colocado as marinhas em uma posição desafiadora, buscando equilibrar uma ampla

gama de demandas, frequentemente conflitantes, relacionadas a plataformas, equipamentos e pessoal (Advani, 2019).

A aplicação da tecnologia stealth em navios de guerra apresenta desafios distintos em relação ao seu uso na aviação naval. Enquanto na aviação, o objetivo é tornar a aeronave o mais invisível possível, melhorando sua capacidade de sobrevivência em áreas de ameaça, essa abordagem não é diretamente aplicável a meios de superfície. A física impõe limitações à capacidade de tornar um grande navio praticamente invisível, mesmo que seu design seja radicalmente modificado (MCGILLVRAY, 1994).

De fato, a busca pela invisibilidade total de navios de superfície não é apenas impraticável, mas também muitas vezes indesejável. Em muitos cenários, é preferível que os navios de superfície sejam visíveis, como em situações de tráfego intenso, durante operações de presença ostensiva ou quando navegando em águas territoriais estrangeiras sob o princípio de passagem inocente, entre outros motivos (MCGILLVRAY, 1994).

Segundo McGillvray (1994), as marinhas enfrentam desafios na identificação do material absorvedor de energia eletromagnética na faixa de micro-ondas (MARE) mais adequado para aplicação naval, o que desempenha um papel crucial na redução da assinatura de radar e alcance da furtividade desejada. O autor ressalta a importância de compreender profundamente as propriedades dielétricas e magnéticas dos materiais, assim como suas características físicas e químicas, a fim de atingir esse objetivo. O desenvolvimento personalizado Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) é destacado como uma medida crucial para garantir a segurança e a soberania em um cenário marítimo cada vez mais desafiador.

1.2 Justificativa e Relevância

O panorama geopolítico global é caracterizado por avanços tecnológicos acelerados e desafios cada vez mais complexos nas operações de defesa, especialmente no ambiente marítimo. Nesse sentido, a escolha e o emprego de materiais que absorvem energia eletromagnética emergem como decisões de extrema importância estratégica para a Marinha do Brasil. Essa importância está ancorada em uma série de fatores internacionais que delineiam o cenário das Marinhas em todo o mundo. Conforme discutido por Jared Diamond (2017) em 'Armas, Germes e Aço', ao longo da história, o acesso a tecnologias avançadas foi crucial para a capacidade de uma sociedade se defender e prosperar. De maneira semelhante, nos tempos contemporâneos, a tecnologia Stealth se revela um componente essencial para a defesa nacional e a manutenção das capacidades estratégicas das Marinhas. Em sua obra "The Innovator's Dilemma", Clayton Christensen aborda a importância da inovação tecnológica para o sucesso das empresas, enfatizando como as empresas que adotam e implementam tecnologias inovadoras conquistam uma vantagem competitiva expressiva. Essa visão ressoa no contexto da defesa nacional, onde a adoção da tecnologia Stealth pode ser interpretada como uma resposta à necessidade de inovação para manter uma vantagem estratégica (Christensen, 1997).

Historicamente, o acesso à tecnologia desempenhou um papel crucial nos conflitos entre civilizações, como exemplificado pelo confronto entre os soldados espanhóis liderados por Francisco Pizarro e o Império Inca, destacando como o acesso a tecnologias avançadas influenciou significativamente a capacidade de uma sociedade se defender e prosperar (Diamond, 2017). A tecnologia Stealth é um exemplo contemporâneo de inovação tecnológica crucial para a defesa nacional, oferecendo a capacidade de tornar navios de guerra e outras plataformas militares menos detectáveis pelos radares inimigos, aumentando a sobrevivência em ambientes hostis. O uso de materiais absorvedores de energia eletromagnética desempenha um papel fundamental nesse contexto, reduzindo a capacidade de detecção de embarcações inimigas.

A manutenção do equilíbrio de poder internacional é um dos pilares que sustentam a necessidade de incorporar a tecnologia Stealth e materiais absorvedores de energia eletromagnética. Na medida em que nações altamente desenvolvidas investem significativamente nessa tecnologia, a Marinha do Brasil deve acompanhar essa tendência para preservar sua capacidade de dissuasão e seu papel na promoção da paz e segurança globais. A aquisição e implementação da tecnologia Stealth e materiais absorvedores de energia eletromagnética representam decisões estratégicas de suma importância para a defesa nacional. Como destacado por Christensen e exemplificado por Diamond, o acesso a tecnologias avançadas desempenhou historicamente um papel crucial na capacidade de uma sociedade ou

nação se proteger e prosperar. No contexto contemporâneo, a tecnologia Stealth é uma dessas inovações tecnológicas cruciais, essencial para a segurança nacional e a manutenção da capacidade estratégica da Marinha do Brasil. A busca pelo equilíbrio de poder internacional torna essas ações estratégicas ainda mais relevantes, à medida que nações altamente desenvolvidas continuam a investir nessa área. Portanto, a incorporação dessas tecnologias é imperativa para garantir a defesa eficaz do país e sua participação efetiva no cenário global (Diamond, 2017).

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar os princípios e aplicações da tecnologia stealth, com ênfase nos meios navais, especificamente no que diz respeito ao uso de materiais absorvedores de micro-ondas. A tecnologia stealth revolucionou a forma como as embarcações militares são detectadas e rastreadas em ambientes marítimos. Para contextualizar adequadamente esse tema, será feita uma breve análise histórica de sua evolução e implementação em nações que a empregam.

Um dos objetivos específicos deste trabalho é explorar a situação atual da Marinha do Brasil (MB) no que se refere à sua capacidade militar em relação aos sistemas furtivos em seus navios. A análise detalhada dessa capacidade fornecerá insights sobre as lacunas existentes e as possibilidades de aprimoramento.

A revisão da literatura também se concentrará na faixa de frequência e radar utilizados em radares navais modernos. Essa análise é essencial para compreender como as embarcações são detectadas e por que materiais absorvedores de micro-ondas desempenham um papel crítico na minimização do perfil de detecção.

A parte prática deste trabalho envolverá a caracterização eletromagnética de um material absorvedor nanoparticulado, resultado de pesquisas que estão sendo realizadas pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (óxidos de diferentes metais disperso em uma matriz polimérica). Pelo fato de ser uma área estratégica denominaremos esses óxidos de diferentes metais disperso em uma matriz polimérica de ferrita. Serão apresentados os resultados desta caracterização eletromagnética, principalmente no que tange ao seu poder de absorção de micro-ondas.

Ao final, este trabalho busca oferecer uma visão abrangente e atualizada sobre o emprego de materiais absorvedores de micro-ondas nos meios navais. Espera-se que os insights e informações apresentados contribuam para aprimorar a compreensão dessa tecnologia, crucial no contexto da defesa naval, e forneçam orientações valiosas para o fortalecimento da capacidade militar da Marinha do Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A evolução da tecnologia no cenário naval moderno tem impulsionado mudanças significativas nas capacidades operacionais das marinhas em todo o mundo. Com o propósito de fortalecer a defesa e garantir a segurança das nações em um ambiente marítimo cada vez mais desafiador, a implementação de tecnologias furtivas e de absorção de energia eletromagnética (MARE) emergiu como uma área de pesquisa estratégica. A compreensão aprofundada das propriedades dielétricas e magnéticas dos materiais, juntamente com suas aplicações práticas, desempenha um papel fundamental no direcionamento do desenvolvimento de soluções inovadoras voltadas para a redução da assinatura radar e o aprimoramento da furtividade das embarcações navais. Nesse contexto, é de suma importância explorar o referencial teórico associado à furtividade e às tecnologia, considerando a relevância desses elementos para a preservação da segurança e da soberania no cenário geopolítico contemporâneo. Este capítulo visa aprofundar o entendimento dos princípios e das aplicações dessas tecnologias, além de destacar as contribuições de pesquisadores proeminentes que moldaram o desenvolvimento desse campo.

Investigar as origens da tecnologia stealth e os princípios fundamentais subjacentes ao funcionamento do radar torna-se crucial para enfrentar os desafios atuais e futuros. A tecnologia stealth representa um componente vital da inovação tecnológica nos meios navais, exigindo uma compreensão aprofundada para apreciar por que as estratégias de furtividade desempenham um papel crucial nas operações das Forças Armadas. Este capítulo busca não apenas apresentar a evolução global da tecnologia stealth nas operações militares, mas também explorar os conceitos fundamentais que sustentam a compreensão da assinatura radar, destacando como a inovação tecnológica continua a aprimorar as operações navais.

2.1 A gênese da furtividade

“O OXCART seria invisível aos radares soviéticos - a primeira aeronave furtiva da história.” (Gene Poteat, 2014)

A necessidade de adotar uma tecnologia stealth começou a ser notada na década de 1950, durante a Guerra Fria, um período de intensa rivalidade entre os Estados Unidos e a União Soviética. Nesse contexto delicado, os Estados Unidos se viram envolvidos em missões de reconhecimento críticas sobre o território soviético. Para desempenhar essas missões, surgiu a aeronave U-2, conhecida como "Dragon Lady" (John, 1996).



Figura 2.1: U- Early images of the U-2 spy aircraft being tested at Area 51

Fonte: *CNET* (KERI, 2013)

À medida que as tensões da Guerra Fria se intensificaram durante a década de 1950, a CIA começou a voar com o avião espião U-2 para monitorar as crescentes capacidades de armas nucleares da União Soviética. Desajeitado e relativamente lento, o U-2 contava com sua capacidade de voar em altitudes extremamente elevadas para evitar caças inimigos e mísseis superfície-ar de curto alcance (Roblin, 2016).

Desenvolvido sob a liderança de Clarence "Kelly" Johnson na Lockheed's Skunk Works, o U-2 tinha a missão de realizar voos de reconhecimento em altitudes excepcionalmente

elevadas, muito além do alcance dos sistemas de defesa aérea existentes na época. Sua capacidade de operar em altitudes superiores a 70.000 pés (cerca de 21.000 metros) tornou-o uma ferramenta inestimável para obter informações estratégicas sobre as atividades soviéticas (Roblin, 2016).

As informações de inteligência fornecidas pelos U-2s em 1962 revelou os mísseis nucleares soviéticos implantados em Cuba, levando aos dramáticos eventos da Crise dos Mísseis Cubanos. No entanto, os U-2s também provocaram incidentes diplomáticos porque simplesmente não conseguiam voar a uma altitude suficientemente alta para evitar os mísseis SA-2 superfície-ar russos. Um U-2 foi abatido em 1960, e seu piloto, Gary Powers, foi capturado, desencadeando uma constrangedora disputa diplomática. Outro U-2 foi derrubado durante a Crise dos Mísseis Cubanos, matando o piloto e escalando as tensões entre Moscou e Washington em um momento crítico. Cinco U-2s taiwaneses foram abatidos sobre a China (Roblin, 2016).

A partir desses acontecimentos críticos durante a era do U-2, emergiu a compreensão de que a tecnologia stealth era vital para a segurança nacional. Embora o U-2 não fosse uma aeronave stealth em si, sua vulnerabilidade ao radar inimigo marcou o início de uma busca incansável por aeronaves verdadeiramente furtivas, capazes de operar sem serem detectadas (Roblin, 2016).

Isso levou ao desenvolvimento de tecnologias stealth, incluindo a redução da assinatura radar das aeronaves, tornando-as menos visíveis aos sistemas de radar inimigos. A busca pela tecnologia stealth teve início devido à vulnerabilidade do U-2 e à necessidade contínua de realizar operações de reconhecimento em territórios hostis, onde permanecer indetectável se tornou crucial para o sucesso das missões e a segurança nacional (Roblin, 2016).

Antes do U-2 se tornar operacional em junho de 1956, os oficiais do projeto da CIA haviam estimado que sua expectativa de vida para voar com segurança sobre a União Soviética seria de 18 meses a dois anos. Após o início dos sobrevoos e a demonstração pelos soviéticos da capacidade de rastrear e tentar interceptar o U-2, essa estimativa parecia otimista demais. Em agosto de 1956, Richard Bissell estava tão preocupado com a vulnerabilidade do U-2 que ele desesperava de sua capacidade de evitar a destruição por seis meses, quanto mais dois anos (Roblin, 2016).

Para estender a vida operacional útil do U-2, os oficiais do projeto primeiro tentaram reduzir a vulnerabilidade da aeronave à detecção pelos radares soviéticos. Os esforços do Projeto RAINBOW para mascarar a imagem de radar do U-2 não apenas se mostraram ineficazes, mas na verdade tornaram a aeronave mais vulnerável, adicionando peso extra que reduzia sua altitude máxima. Como os operadores de radar soviéticos continuavam a encontrar e rastrear U-2s equipados com sistemas antirradar, a CIA cancelou o Projeto RAINBOW em

maio de 1958 (Roblin, 2016).

Muito antes do fracasso do Projeto RAINBOW, Richard Bissell e seu Assistente da Força Aérea começaram a procurar uma solução mais radical para o problema da detecção pelo radar soviético - uma aeronave completamente nova. No final do verão de 1956, os dois oficiais visitaram várias empresas de estruturas de aeronaves em busca de novas ideias. Uma das mais incomuns foi a proposta da Northrop Aviation de uma aeronave gigantesca com uma asa de elevação muito alta. Como não seria feita de metal, a asa exigiria um tipo de treliça na parte superior para dar rigidez. A aeronave proposta atingiria altitudes de 80.000 a 90.000 pés, mas apenas a velocidades subsônicas, apenas o suficiente para mantê-la no ar (Roblin, 2016).

O design de baixa velocidade da Northrop não resolveu o problema da detecção pelo radar, e em 1957 o foco mudou para designs supersônicos. Em agosto de 1957, a Northrop que vinha trabalhando em maneiras de reduzir a vulnerabilidade do U-2 ao radar, começou a investigar a possibilidade de projetar uma aeronave com uma seção reta de radar muito pequena. logo descobriu que a velocidade supersônica reduzia muito as chances de detecção pelo radar. A partir desse ponto, a atenção da CIA se concentrou cada vez mais na possibilidade de construir uma aeronave que pudesse voar a altas velocidades e altitudes extremamente altas, incorporando as melhores ideias em técnicas de absorção ou deflexão de radar (Roblin, 2016).

No outono de 1957, a CIA, liderada por Richard Bissell, começou a considerar a necessidade de um sucessor para o U-2 devido à crescente vulnerabilidade desta aeronave às defesas antiaéreas soviéticas. Para ajudar na seleção desse sucessor, foi criado um comitê consultivo presidido por Edwin Land e composto por cientistas proeminentes (Roblin, 2016).

Duas empresas, Lockheed e Convair, se destacaram na busca pelo novo projeto. Lockheed, que já havia projetado o U-2, desenvolveu conceitos de alta velocidade e altitudes acima de 90.000 pés, resultando em projetos chamados "Archangel" (Roblin, 2016).

No final de 1958, a Lockheed estava focada no desenvolvimento de aeronaves que podiam operar em altitudes elevadas e alta velocidade. Enquanto isso, a Convair continuou a trabalhar em um projeto que envolvia uma aeronave lançada de um bombardeiro B-58B, chamado "FISH" (Roblin, 2016).

Esses esforços iniciais marcaram o início da busca por uma aeronave verdadeiramente furtiva que pudesse operar sem ser detectada pelos radares inimigos. A necessidade de tecnologia stealth surgiu da vulnerabilidade do U-2 durante a Guerra Fria, quando missões de reconhecimento eram cruciais para a segurança nacional dos Estados Unidos (Roblin, 2016).

No final do verão de 1959, tanto a Convair quanto a Lockheed apresentaram novos projetos como sucessores do U-2. A Convair propôs o KINGFISH, que usava tecnologia desenvolvida

em outras aeronaves e tinha uma seção reta de radar menor devido ao design compacto e aos motores internos. A Lockheed apresentou o A-12, que empregava uma inovação de adição de cério no combustível para reduzir a Seção reta Radar da pluma do pós-combustor. Ambos os projetos foram submetidos a um painel de seleção em agosto de 1959, com o A-12 da Lockheed tendo ligeira vantagem em desempenho e custo, mas o KINGFISH da Convair sendo superior em termos de detecção por radar devido ao seu tamanho menor e à disposição interna dos motores (Roblin, 2016).

A Lockheed e a Convair apresentaram projetos para uma aeronave de reconhecimento de alta velocidade, destinada a suceder o U-2. Inicialmente, alguns representantes da CIA preferiram o projeto KINGFISH da Convair devido à sua menor seção reta de radar. No entanto, membros da Força Aérea convenceram a CIA a apoiar o projeto da Lockheed devido a preocupações com os históricos de custos excessivos e atrasos da Convair no projeto B-58. Além disso, a Lockheed já tinha experiência em manter instalações altamente seguras, o que favoreceu sua escolha (Roblin, 2016).

Esse caso da escolha entre o projeto KINGFISH da Convair e o da Lockheed para suceder o U-2 destaca a importância de avaliar cuidadosamente não apenas o desempenho técnico de uma solução, mas também outros fatores, como histórico de custos e prazos, segurança e experiência da equipe envolvida. Às vezes, a opção mais tecnicamente avançada pode não ser a melhor escolha devido a preocupações práticas e estratégicas (Roblin, 2016).

No caso mencionado, a Lockheed foi escolhida em parte devido à sua capacidade comprovada de gerenciar instalações altamente seguras, o que era crucial para um projeto altamente confidencial como o OXCART. Essa escolha levou a avanços significativos em várias áreas da tecnologia aeroespacial, mesmo que o OXCART não tenha alcançado totalmente seus objetivos iniciais de substituir o U-2 (Roblin, 2016).

A decisão de escolher a Lockheed sobre a Convair demonstra que, em projetos complexos, muitas vezes é necessário equilibrar considerações técnicas com fatores práticos e estratégicos para alcançar o melhor resultado global. Isso também destaca a importância de aprender com as lições do passado para tomar decisões mais informadas no presente (Roblin, 2016).

O projeto OXCART foi uma iniciativa ultrassecreta da CIA e da Força Aérea dos Estados Unidos para desenvolver uma aeronave de reconhecimento de alta velocidade e altitude durante a Guerra Fria. O resultado desse projeto foi o avião A-12, que se tornou o precursor do famoso SR-71 Blackbird (Roblin, 2016).

O Blackbird foi o primeiro avião operacional projetado intencionalmente com uma seção reta de radar reduzida para minimizar a chance de detecção. As "chines" do Blackbird - as bordas afuniladas como lâminas da fuselagem - eram até mesmo revestidas com uma tinta

de ferro-ferrita absorvente de radar para ajudar a reduzir as faixas de detecção de radar. As "chines" também foram descobertas como fornecedoras de elevação adicional e maior estabilidade aerodinâmica (Roblin, 2016).

No entanto, o Blackbird não era um avião stealth pelos padrões modernos - tinha uma seção reta de 10 metros quadrados - que a tecnologia de radar soviético logo se mostrou capaz de detectar de qualquer maneira. Agravando o problema estavam as enormes plumas de calor emitidas pelos motores do SR-71, que perturbavam as partículas de ar atrás dele de maneira visível para o radar (Roblin, 2016).

O A-12 e, posteriormente, o SR-71 Blackbird, representaram avanços significativos na tecnologia de aeronaves furtivas, embora não sejam classificados como aeronaves furtivas tradicionais. Eles adotaram uma abordagem diferente para evitar detecção por radar, confiando em velocidades extremamente altas e altitudes elevadas para escapar de radares inimigos. Essas aeronaves foram projetadas com geometrias e formas especiais para ajudar a dispersar as ondas de radar e minimizar a assinatura radar. Além disso, suas velocidades Mach muito altas também dificultavam o rastreamento e a interceptação por parte de aeronaves inimigas (Roblin, 2016).

Em termos de inovação tecnológica, o A-12 e o SR-71 incorporaram várias características revolucionárias, como materiais de fuselagem avançados para resistir ao calor gerado pela alta velocidade, sistemas de resfriamento especializados e motores J58 únicos que permitiram operações em Mach 3 ou superior (Roblin, 2016).

Embora essas aeronaves não tenham usado a tecnologia stealth da maneira como a conhecemos hoje, elas desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento de conceitos de redução de assinatura radar e, de certa forma, pavimentaram o caminho para futuras aeronaves stealth. Portanto, o projeto OXCART e o subsequente SR-71 Blackbird são marcos importantes na história da aviação e da tecnologia stealth (Roblin, 2016).

A empresa *Lockheed* acumulou ampla experiência ao desenvolver seu famoso caça stealth F-117 "*Night Hawk*", que fez sua estreia pública na "Operação Tempestade no Deserto" de 1991. Antes disso, a aeronave evasiva ao radar já havia participado de ações nos céus de Granada e voado tão cedo quanto junho de 1981, como parte do programa ultrassecreto "*Have Blue*". A aeronave foi construída com base em muitas técnicas de evasão e absorção de radar, principalmente revestimentos externos especiais e superfícies angulares. Com base nesse conhecimento, os engenheiros da *Lockheed* aplicaram o mesmo conceito a uma embarcação oceânica, resultando no "*Sea Shadow*" (IX-529) - o primeiro navio stealth do mundo. (Military Factory, 2017)



Figura 2.2: Sea Shadow (IX-529) - Protótipo de navio furtivo desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos.

Fonte: Lockheed Martin (2020)

O design inicial do Sea Shadow na verdade era destinado a testes submarinos e envolvia um casco em forma de charuto coberto com placas facetadas. A intenção era limitar os retornos de sonar, e isso levou os engenheiros a descobrirem resultados significativos em seu trabalho com o modelo de submarino. No entanto, a Lockheed teve dificuldades para convencer o Pentágono dos méritos de um submarino stealth, especialmente um que se mostraria mais lento do que os tipos existentes. Portanto, a ideia gradualmente evoluiu para a de um navio de guerra stealth, que despertou o interesse da DARPA, a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa, e um contrato foi firmado entre o departamento e a Lockheed's Skunk Works. (Military Factory, 2017)

O programa *Sea Shadow* ganhou impulso no início dos anos 1980, assim como o F-117 estava começando a ser adotado no inventário da Força Aérea dos EUA como a primeira aeronave stealth operacional do mundo. O projeto *Sea Shadow* foi mais uma das empreitadas ultrassecretas da *Lockheed*, pois a embarcação não foi revelada ao público até algum tempo depois, na verdade, somente em 1993. A embarcação foi montada em *Redwood City*, Califórnia, enquanto estava abrigada sob o "*Hughes Mining Barge*" (HMB-1), uma embarcação submarina tipo balsa com dispositivo de elevação integrado - desenvolvida especificamente para resgatar o submarino da Marinha Soviética afundado, o K-129, que foi perdido em março de 1968. A balsa de mineração foi lançada em 1974 e passou por modificações para se tornar uma doca flutuante. (Military Factory, 2017)

O próprio Sea Shadow tinha uma aparência completamente única no mundo das embarcações navais. Parecia um design de catamarã, embora fosse, na verdade, uma embarcação de Casco Gêmeo de Área de Pequena Superfície - ou "*SWATH*" - e sua estrutura de casco estava completamente elevada acima da água. Essa abordagem permitia que a embarcação tivesse estabilidade inerentemente boa em mares agitados e fosse mais rápida ao cortar a água. O casco utilizava a abordagem angular já vista na fuselagem asa-fuselagem do F-117, e sua ponte estava adequadamente contornada na frente da embarcação. Uma linha de telhado achatada servia como um convés e havia protuberâncias limitadas ao longo do comprimento do telhado. Escotilhas de acesso também eram vistas ao longo da linha do telhado. A tabela de lotação completa contava com apenas quatro tripulantes (timoneiro, comandante, engenheiro e navegador), pois a automação de sistemas era outro componente-chave do programa. (Military Factory, 2017)

O Sea Shadow, uma inovação precursora em tecnologia stealth, teve um impacto significativo na pesquisa desse campo, enquanto a classe Zumwalt, liderada pelo USS Zumwalt, simboliza a próxima geração de destróieres da Marinha dos EUA, apresentando avanços notáveis em tecnologia stealth, propulsão e habilidades de combate (Larter, 2019).



Figura 2.3 Primeira navegação futura do USS Zumwalt no mar.

Fonte: Official U.S. Navy Page (2015)

A classe Zumwalt, por outro lado, teve seu desenvolvimento concebido nos anos 1990. Esses destróieres apresentam um design altamente furtivo, com ângulos que minimizam a assinatura de radar. Eles são conhecidos por seu sistema de propulsão avançado, que usa uma usina elétrica integrada e motores elétricos. Projetados para uma variedade de missões, incluindo ataques terrestres, defesa aérea e guerra naval, os destróieres da classe Zumwalt

representam uma nova geração de tecnologia de navios de guerra na Marinha dos EUA. (Larter, 2019)

O USS Zumwalt (DDG-1000) é o primeiro navio da classe Zumwalt e foi comissionado em 2016. Ele incorpora técnicas furtivas avançadas, como um design angular e sistemas para minimizar sua assinatura de radar. (Larter, 2019). A busca pela furtividade na defesa nacional envolveu o desenvolvimento de aeronaves e navios furtivos altamente avançados. Essas tecnologias revolucionárias têm sido essenciais para a segurança dos Estados Unidos, proporcionando vantagens estratégicas significativas. Agora, exploraremos os princípios-chave que sustentam essas capacidades furtivas.

2.2 Preceitos para a furtividade

Para compreender plenamente o papel do stealth na transformação de grandes veículos em alvos praticamente invisíveis aos radares, é crucial não apenas compreender sua história, mas também conhecer os princípios subjacentes e a aplicação prática desses conceitos. Ao mergulhar mais fundo nesse tópico, exploraremos não apenas os fundamentos do funcionamento dos radares, mas também os detalhes intrínsecos que fazem do stealth uma tecnologia quase indetectável por esses sistemas. A análise abrangente desses elementos nos permitirá apreciar a evolução contínua da tecnologia stealth e seu impacto nas operações navais e de defesa.

2.2.1 Conceitos Iniciais do RADAR

A palavra RADAR, cuja tradução "*Radio Detection Rangement*" refere-se a um sistema que opera emitindo energia eletromagnética e analisando as características do seu eco. De forma concisa, o radar é usado principalmente para aprimorar a percepção visual humana e extrair dados dos seus alvos, como velocidade e distância (BARBOZA, 2016).

Seu funcionamento baseia-se no fenômeno de reflexão da energia eletromagnética. Ao enviar uma onda com essas características em direção a um objeto, obtemos o sinal refletido, conhecido como eco.

Os ecos do radar podem ser categorizados como reflexões, efeitos de cavidade, difrações ou ondas de superfície. Esses sinais originam-se devido à interação de um campo magnético incidente que gera correntes no alvo, resultando na criação de um novo campo que se propaga pelo espaço, composto por ondas interligadas (BARBOZA, 2016).

Para determinar a distância entre o radar e o alvo (ΔR), calcula-se metade do produto entre a velocidade de propagação da onda (c) e o tempo de duração do pulso (τ),

levando em consideração a velocidade da luz no meio, conforme indicado pela CIAW (2002).

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

2.2.2 A detecção de um alvo

A detecção de um alvo é primariamente influenciada pela diretividade (D) da antena do radar, que se refere à sua capacidade máxima de emissão (Imax). A intensidade radiante (Iiso) é uma medida da potência irradiada (P) por unidade de ângulo sólido (4π) (CIAW, 2002; NERI, 2018).

Quando essa diretividade é focada de maneira altamente concentrada, torna-se possível determinar com precisão a posição do objeto em relação a esse ponto de emissão.

$$I(\theta_B, \varphi_B) = \frac{P}{4\pi} = I_{iso} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$D = \frac{I_{max}(\theta_B, \varphi_B)}{I_{iso}} = \frac{I_{max}(\theta_B, \varphi_B)}{P/4\pi} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Um exemplo ilustrativo dessa aplicação é apresentado na Figura 2.7. Em radares de Controle de Tráfego Aéreo, são empregadas antenas de alta precisão para a determinação do azimute, mas com uma ampla abertura em relação à elevação, visando garantir a cobertura abrangente necessária. Isso assegura a detecção de alvos em várias altitudes, permitindo a determinação de suas posições em um ângulo de 360° ao redor da antena (NOHRA, 2022).

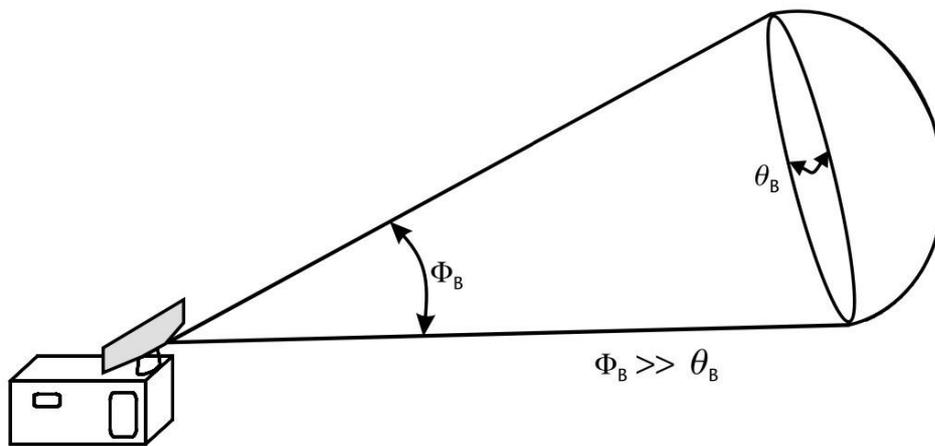


Figura 2.4 – Feixes RADAR em forma de leque

Fonte: *Introduction to Electronic Defense Systems* Artech House (NERI, 2018)

No entanto, uma fração da energia proveniente do sinal refletido pelo alvo sofre dissipação. Assim, surge o conceito de ganho (G), que é determinado pela relação entre o ângulo sólido (4π), a área efetiva da antena (A_{eff}) e o comprimento de onda (λ) (CIAW, 2002).

$$G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Devido à fraqueza do sinal de entrada no receptor do radar, é imperativo realizar uma amplificação para torná-lo utilizável. Contudo, é importante mencionar que o sinal de ruído térmico na entrada do amplificador também será amplificado, o que complica o cálculo do ganho do amplificador. Portanto, para simplificar, geralmente adota-se a consideração de um amplificador ideal (isento de ruído) e, adicionalmente ao sinal, introduz-se um ruído equivalente N na entrada (NERI, 2018).

$$N = kTBF \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Na Equação 2.5, k representa a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ W}/(\text{Hz} \cdot ^\circ\text{K})$), T denota a temperatura padrão (290K), B corresponde à largura de banda equivalente do receptor, e F é a figura de ruído do receptor.

No entanto, quando se decide se um alvo muito distante está presente ou ausente, há um risco envolvido. Se um ruído for erroneamente interpretado como um alvo, ocorre o que é conhecido como falso alarme. Por outro lado, se um sinal de baixa potência for confundido com ruído, isso resulta na perda do sinal. Portanto, na prática, é essencial que a potência do sinal de eco (S) seja significativamente maior em relação à potência de ruído no receptor (R), o que leva ao cálculo da Relação Sinal-Ruído, S/N (CIAW, 2002; NERI, 2018).

$$\frac{S}{N} = \frac{PG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 R^4 FkTBL} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Quando o pulso eletromagnético incide sobre o alvo, a reação do alvo pode incluir absorção, reflexão ou dispersão da onda. Essa resposta depende de diversos fatores, como o material do qual o alvo é feito, seu tamanho, formato, a frequência ou comprimento de onda do radar e o ângulo em que o pulso atinge a superfície do alvo (MCGILLVRAY, 1994).

Portanto, a relação entre a potência re-irradiada (P_r) em uma determinada direção e a densidade de potência refletida pelo alvo (p_r) é conhecida como seção reta do alvo (σ). Para calcular essa densidade de potência refletida, multiplica-se a potência do pulso transmitido " P " pela eficiência da antena " G " e divide-se pela área do feixe de 3dB, levando em consideração a distância " R " na qual o alvo está localizado (CIAW, 2002).

$$p_r = \frac{PG}{4\pi R^2} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$\sigma = \frac{P_r}{p_r} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

No Apêndice A, é apresentada uma série de valores que representam seções reta para uma variedade de objetos, que vão desde insetos pequenos até porta-aviões de grande porte. Esses valores são frequentemente expressos em unidades de medida como metros quadrados (m²) ou decibéis-metros quadrados (dBm²).

2.2.3 Características da reflexão

Conforme explicado pelo Contra-Almirante Tiudorico Leite Barboza (2016) em seu artigo para a Revista Marítima, a expressão mencionada acima pela Equação 2.7, embora amplamente utilizada, não é adequada para descrever alvos muito pequenos, nos quais o fenômeno de ressonância se torna relevante. Ele afirma que a SRR representa a relação entre a energia difundida por unidade de ângulo sólido e a densidade de energia incidente por unidade de superfície.

A definição prática dessa relação depende do tipo de radar em questão. No caso de radares monoestáticos, a potência re-irradiada é aquela que retorna na direção da transmissão. Nesse contexto, cada área da superestrutura do alvo age como um irradiador elementar independente (CIAW, 2002).

Assim, substituindo os valores das Equações 2.7 e 2.8, podemos calcular a potência re-irradiada pelo alvo na direção da antena do radar, conforme demonstrado na Equação 2.9.

$$Pr = (Pg * \sigma) / (4 * \pi * R^2) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Cada pequeno componente, como suportes de armas, antenas de radar, corrimãos, armários de convés, ou seja, microgeometrias distintas, refletem separadamente a energia com base em sua forma, tamanho e orientação em relação ao comprimento de onda da iluminação do radar. Todas essas reflexões, tanto das macrogeometrias quanto das microgeometrias, se somam e contribuem para a SRR total. Portanto, a potência irradiada em uma direção específica resulta na combinação vetorial dos sinais elementares, que também é influenciada pelas vibrações e movimentos do alvo (MCGILLVRAY, 1994).

Essas reflexões provenientes de várias partes do alvo podem se somar de maneira construtiva, aumentando o eco, ou podem se anular mutuamente de maneira destrutiva (MCGILLVRAY, 1994).

Existem duas abordagens para medir esses fenômenos, conforme ilustrado nas Figuras 2.8 e 2.9. As medições feitas em campo aberto enfrentam desafios, como interferências de ruído ambiental, reflexões indesejadas e condições climáticas adversas. Portanto, preferencialmente, essas medições são conduzidas em uma câmara anecóica (NOHRA, 2022).

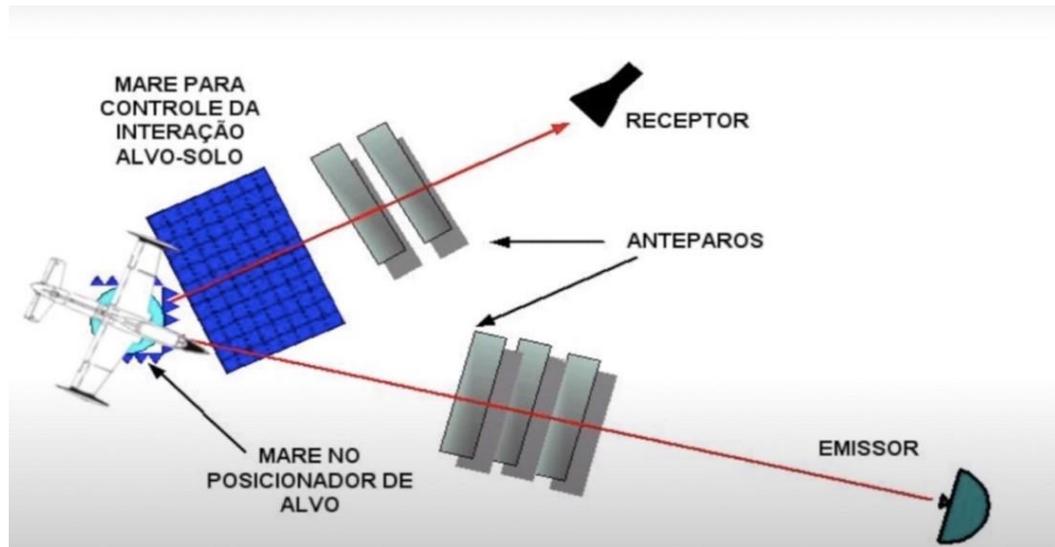


Figura 2.5 – Medição da SRR em campo aberto

Fonte: Guerra Eletrônica #22 Seção Reta Radar (NOHRA, 2022)

Nesse contexto, vários fatores podem impactar o cálculo da SRR, como destacado por (BARBOZA, 2016):

- A posição relativa do transmissor e/ou receptor em relação ao alvo;
- A geometria do alvo e sua composição material;
- A orientação angular do alvo em relação ao transmissor e receptor;
- A frequência ou comprimento de onda utilizados; e
- A polarização do transmissor e do receptor.

Devido à complexidade envolvida na obtenção de resultados precisos da SRR para fuselagens complexas, é fundamental compreender os valores das seções retas para geometrias elementares mais simples e homogêneas, como ilustrado na Figura 2.10. Isso se deve ao fato de que as fuselagens complexas são, na verdade, compostas por várias superfícies geometricamente simples (BARBOZA, 2016).

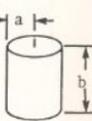
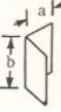
GEOMETRIA	MÁXIMO VALOR DE RCS
 Placa plana de Superfície S	$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}$
 Cilindro	$\sigma = \frac{2ab^2}{\lambda}$
 Esfera	$\sigma = \pi a^2$
 Diplano ou diedro	$\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$
 Triedro triangular	$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$
 Triedro quadrangular	$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$
 Triedro circular	$\sigma = \frac{15,7a^4}{\lambda^2}$

Figura 2.10 – Expressões de SRR para geometrias elementares simples
 Fonte: PRINCÍPIOS DA TECNOLOGIA STEALTH (BARBOZA, 2016)

Além disso, é de extrema importância considerar as questões relacionadas à assinatura dos radares. Como mencionado no livro "Introduction to Electronic Defense Systems" da Artech House, escrito por um eminente especialista em guerra eletrônica, Filippo Neri (2018), em cenários operacionais reais, é crucial levar em conta o ambiente de operação, uma vez que diversos fenômenos naturais podem impactar significativamente a capacidade de detecção do radar. Esses fenômenos abrangem:

- A atenuação do sinal, que ocorre devido às características do meio de transmissão;
- A geração de sinais indesejados na tela do radar, conhecida como Plan Position Indicator (PPI), resultante de fatores como topografia do terreno, movimentação das ondas do mar, presença de obstáculos pontuais, dispersão provocada por nuvens e chuva, entre outros;
- Variações na intensidade do sinal devido à reflexão de raios pelo mar ou solo;
- Atenuação do sinal devido ao horizonte ou à presença de montanhas;
- A propagação anômala do sinal em condições atmosféricas especiais, como ductos, que podem resultar em um alcance maior ou desvio em relação à trajetória prevista.

2.2.4 Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

A nanotecnologia, que se baseia na manipulação de átomos e moléculas, desempenha um papel crucial em diversas áreas, incluindo medicina, indústria eletrônica e materiais de construção. Com o avanço contínuo da nanotecnologia, a capacidade humana de manipular a matéria em sua escala mais fundamental tem sido notavelmente revolucionada. Na área da medicina, observou-se um desenvolvimento significativo de sistemas de liberação de medicamentos controlados e tratamentos para doenças antes consideradas incuráveis. Além disso, sua aplicação tem impulsionado a produção de materiais mais leves e resistentes, promovendo eficiência na construção de aeronaves e automóveis. No setor eletrônico, a nanotecnologia tem permitido a produção de componentes menores e mais potentes, contribuindo para avanços na computação e eletrônica portátil, bem como no desenvolvimento de baterias mais eficientes em direção a fontes de energia limpa (LIMA NETO, 2013) (Schulz, 2008).

A nanotecnologia também promete possibilidades futuras empolgantes, como a criação de materiais inovadores, incluindo tecidos inteligentes, revestimentos altamente resistentes para veículos e couraças à prova de balas para uso em roupas civis, militares e policiais. Além disso, espera-se em breve a realização de revestimentos de edifícios e roupas com capacidades adaptativas, como regulação de temperatura e mudança de cor. Uma das aplicações proeminentes dos nanomateriais é a utilização como materiais absorventes de radar (MARE) em revestimentos e estruturas para aplicações camufladas e stealth. Com o auxílio desses materiais, é possível aprimorar a furtividade de embarcações militares, reduzindo sua assinatura radar e tornando-as virtualmente invisíveis a sistemas de detecção convencionais. Além disso, a nanotecnologia tem um papel crucial na minimização da assinatura infravermelha e hidroacústica das embarcações, proporcionando uma vantagem estratégica em operações

navais (Sharon, 2019) (Monti, 2015) (Richards, 2009).

Os MAREs, uma classe especial de materiais que convertem micro-ondas em outra forma de energia, como calor, têm sido alvo de muita pesquisa. Eles têm a capacidade de melhorar a furtividade de aeronaves militares, transformando a onda incidente em calor em vez de refleti-la para o radar. Geralmente, os MAREs são utilizados em conjunto com outras tecnologias furtivas, como adaptações no projeto de aeronaves para minimizar a seção reta radar (Radar Cross Section - SRR) (RANA; FANGUEIRO, 2016).

A exploração de materiais absorvedores de radar teve início na década de 1930, logo após a invenção do radar. Diversos tipos de absorvedores foram desenvolvidos, desde pirâmides espessas até camadas múltiplas e revestimentos exclusivos, com o objetivo de otimizar sua eficiência em amplas faixas de frequência. Esses materiais encontraram aplicações comerciais significativas, incluindo em câmaras anecoicas, reduzindo os sinais refletidos por edifícios e superestruturas próximas a instalações de radar. No contexto da detecção de ondas eletromagnéticas, a exploração do espectro eletromagnético abrange várias frequências, desde o ultravioleta até micro-ondas e rádio, utilizando os princípios da óptica física para alcançar a redução da assinatura (TR, 2005).

A detecção de um alvo é medida em termos da seção reta de radar (SRR), que está relacionada ao tamanho, forma e material do alvo, representando a relação entre a potência incidente e a potência refletida. Além disso, os materiais capazes de atenuar a energia da onda eletromagnética incidente incluem ferritas (óxidos cerâmicos), o negro de fumo, os polímeros condutores e os filmes finos (Gonçalves, 2016). Dentre os absorvedores mais comuns na faixa de 8,2 a 12,4 GHz estão os absorvedores piramidais e os absorvedores de carbono condutivo (Smith, 1998).

A Figura 2.7 mostra como a onda eletromagnética é atenuada por intermédio de um absorvedor piramidal, enquanto a Figura 2.8 apresenta a Câmara Anecoica do Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM). A utilização desses materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MAREs) tem sido cada vez mais relevante, não apenas em aplicações militares, mas também em áreas como blindagem eletromagnética de equipamentos e sistemas de comunicação sem fio (Vergara, 2019).

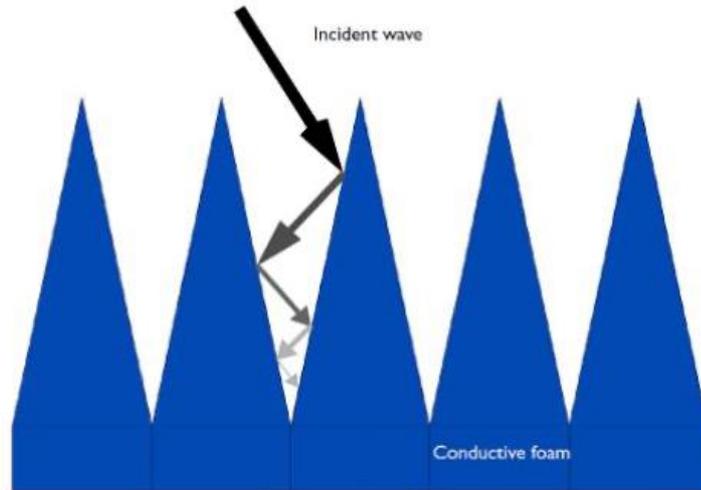


Figura 2.7 – Exemplo de funcionamento de uma MARE

Fonte: *RF-IR Stealth (Techniques/Benefits)* (RF-IF, 2016)

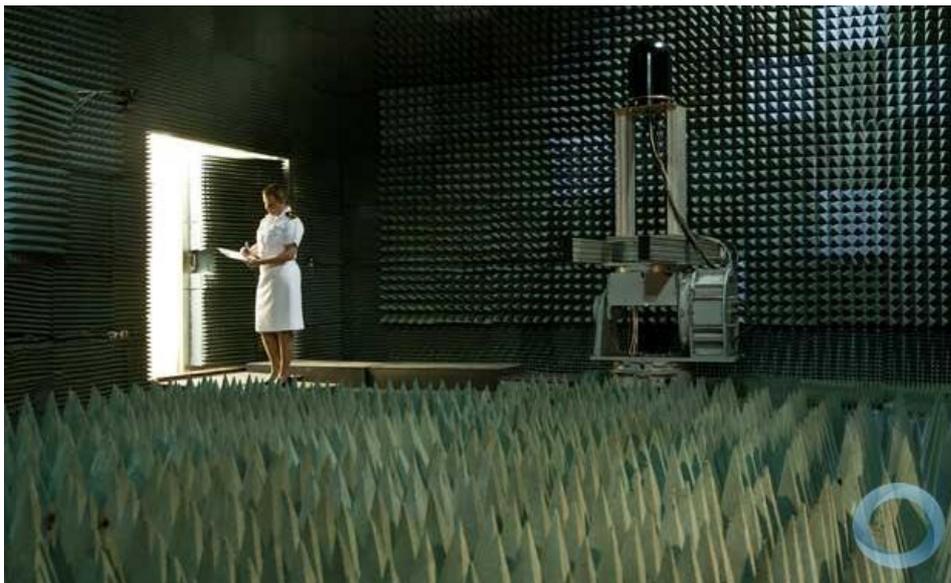


Figura 2.8 – Câmara Anecóica do Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM)

Fonte: Rio exibe um surpreendente conjunto de centros de pesquisa ligados à Marinha (RIO, 2011)

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

Neste estudo, optamos por adotar uma abordagem que mescla elementos qualitativos e quantitativos, buscando uma análise abrangente. Na etapa inicial, investigamos o contexto histórico para obter uma compreensão mais aprofundada dos eventos que moldaram a concepção e o desenvolvimento da tecnologia em discussão. No embasamento teórico, enfatizamos a apresentação de dados matemáticos, com o intuito de aprofundar a compreensão sobre a funcionalidade da seção reta radar.

Além disso, como parte prática do trabalho, foi realizada a caracterização eletromagnética de um compósito composto por ferrita, disperso em um material polimérico. Por questões de confidencialidade, aqui, denominaremos de ferrita.

3.1.1 Quanto aos fins

Considerando os propósitos deste trabalho, buscou-se adotar uma abordagem exploratória para proporcionar uma compreensão mais aprofundada de um tema relativamente menos explorado no cenário acadêmico, tanto nacional quanto internacional. A intenção era despertar interesse e familiaridade com os avanços tecnológicos referentes ao stealth, especialmente no âmbito da Marinha. O trabalho foi orientado por uma base teórica sólida e pela exposição de conhecimentos relevantes, visando a disseminação de informações cruciais sobre o desenvolvimento e a aplicação da tecnologia stealth em contextos navais.

3.1.2 Quanto aos meios

Para a condução deste estudo, utilizou-se principalmente de pesquisas bibliográficas e documentais, que incluíram uma variedade de fontes como artigos publicados, informações provenientes de sites especializados em assuntos militares, e documentos oficiais relacionados aos princípios fundamentais do radar e da tecnologia stealth.

A análise dessas referências foi realizada de forma criteriosa, levando em consideração a credibilidade e a reputação dos autores, o que contribuiu para a robustez e confiabilidade das informações abordadas no trabalho.

Além disso, é importante ressaltar que o estudo também contou com a execução de um experimento em colaboração com o Encarregado da Divisão de Cerâmicas Avançadas do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), com o intuito de verificar a capacidade de absorção de micro-ondas de um compósito polimérico.

3.2 Limitações do Método

No decorrer deste trabalho, algumas limitações metodológicas se fizeram presentes. Em especial, o acesso a informações detalhadas e precisas sobre o desenvolvimento da tecnologia stealth foi restrito devido ao caráter sigiloso e confidencial desse campo de pesquisa. Portanto, as fontes de informação acessíveis estavam limitadas a materiais de domínio público e a documentos que oferecessem uma visão geral sobre o tema. Além disso, a veracidade das informações coletadas foi abordada com cautela, considerando a possibilidade de viesamentos políticos e estratégicos por parte de países detentores dessas tecnologias.

3.3 Coleta e Tratamento de Dados

A etapa inicial deste estudo envolveu uma cuidadosa delimitação do escopo de pesquisa, permitindo a organização sistemática dos tópicos a serem abordados e a definição da sequência apropriada para sua apresentação. A pesquisa bibliográfica foi enriquecida com a coleta de dados provenientes do site oficial da CIA, entre outras fontes confiáveis, o que contribuiu significativamente para a construção de uma visão abrangente sobre o desenvolvimento histórico e contemporâneo da tecnologia stealth nos Estados Unidos.

A abordagem histórica adotada baseou-se, em grande parte, em análises de artigos internacionais que exploravam as fases iniciais do projeto stealth nos EUA. Além disso, o capítulo dedicado à aplicação dessa tecnologia em navios de superfície fundamentou-se em um estudo publicado pela Escola de Guerra Naval norte-americana, reforçando a credibilidade e a solidez das informações investigadas.

Muitos dos conceitos relacionados à tecnologia stealth ainda estão em constante evolução, com grande parte dos avanços concentrados em pesquisas e testes laboratoriais. Nesse sentido, algumas informações foram obtidas por meio de divulgações oficiais do país detentor da referida tecnologia. Dadas as complexidades e o caráter técnico de determinados aspectos, temas mais avançados, como os relacionados aos radares que utilizam entrelaçamento quântico, foram tratados como conteúdo adicional no apêndice do estudo.

É essencial ressaltar que uma parte significativa dos tópicos relacionados à tecnologia stealth permanece em constante evolução, passando por fases de pesquisa e testes laboratoriais. Dessa forma, algumas informações fundamentam-se nas divulgações provenientes do país que detém o conhecimento nesse campo. Considerando a natureza complexa e técnica de certos aspectos, como a aplicação de radares baseados em entrelaçamento quântico, optou-se por tratá-los como um conteúdo suplementar, anexado no apêndice.

4 O USO DA FURTIVIDADE NOS MEIOS DE SUPERFÍCIE

4.1 Utilidade da furtividade nos meios de superfície

O conceito de furtividade naval, que busca tornar navios de guerra e embarcações militares menos detectáveis por sistemas de vigilância e sensores inimigos, representa uma abordagem fundamental na moderna estratégia militar marítima (Naval Technology, 2020). Isso envolve o uso de uma série de tecnologias e estratégias, incluindo o emprego de materiais absorventes de radar (RAM) para reduzir a assinatura radar da embarcação, bem como o design cuidadoso da forma do casco e superestruturas para refletir ou direcionar as ondas de radar a fim de minimizar sua detecção (MCGILLVRAY, 1994).

O desenvolvimento da tecnologia de radar trouxe a capacidade de detectar a presença de navios inimigos precocemente, mas também tornou desafiador operar ou se esconder sem notificar o inimigo da presença de navios de guerra amigos. Portanto, a sobrevivência das embarcações navais amigas tem sido ameaçada, e é crucial aplicar tecnologias de baixa observabilidade para evitar a detecção por radar inimigo. A redução da seção reta radar (SRR) é um fator crucial na tecnologia stealth, uma vez que quanto menor a SRR, melhor a capacidade de evasão da detecção por radar.

A tecnologia de stealth eletromagnético (EM) se concentra em reduzir a SRR e se tornou um objetivo de design vital para embarcações navais táticas. Um exemplo notável é o destróier Zumwalt da Marinha dos Estados Unidos, que foi projetado para ter uma SRR notavelmente baixa, apesar de ser muito maior do que qualquer outro destróier ativo. A chave para esse design extremamente orientado para o stealth é o desenvolvimento de um sistema de mastro integrado, que aloja todos os principais radares, sensores e antenas das embarcações navais, reduzindo drasticamente a SRR.

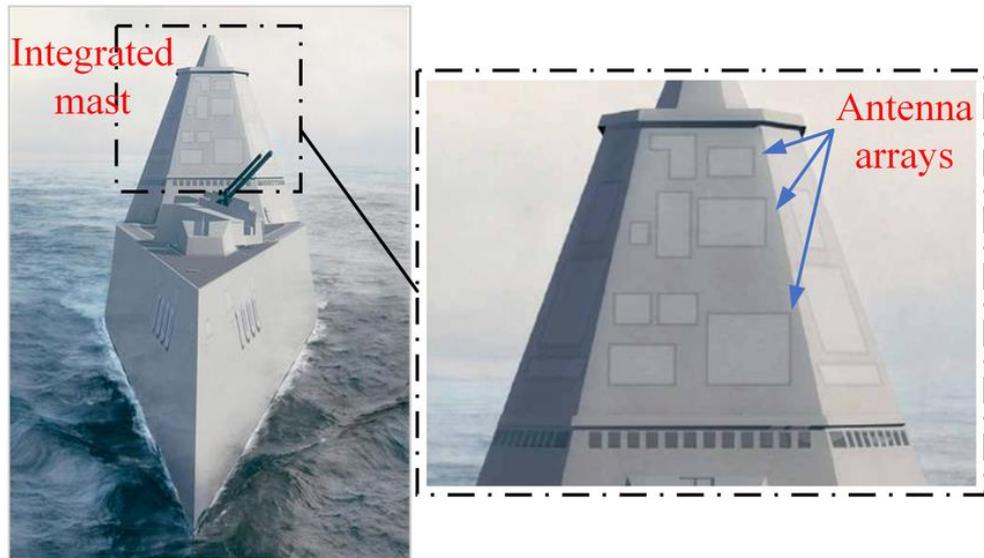


Figura 4.1 - Isolamento fornecido por superfície de metas entre conjuntos de antenas.

Fonte: *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* (Zhang, 2022)

O desempenho real do tratamento dessa tecnologia furtiva nos meios militares é bastante sigiloso, o que dificulta a pesquisa pelos resultados dos testes relacionados à eficácia dessa furtividade contra suas detecções. Entretanto, a tabela apresentada pelo Apêndice A, a qual foi adaptada por uma pesquisa publicada em um artigo da U.S. Naval War College por McGillvray(1994), ilustra um conceito geral das medidas de SRR.

Nesse mesmo artigo é relatado um outro estudo, no qual aponta-se o quanto é elevada a capacidade de sobrevivência de um navio quando lhe é aplicado o stealth. De acordo com o autor, "Uma fragata ou contratorpedeiro típico pode ter uma SRR de 25.000 metros quadrados [44 dBsm] podendo ser reduzida para 12.500 metros quadrados por meio de uma redução de 3 dBsm (atingível com algumas tintas absorventes de radar de baixo desempenho) e para apenas 6.300 metros quadrados [38 dBsm] com outros materiais MARE.

Em uma plataforma equipada com lançadores de chaff modernos, onde a SRR é reduzida [com a modelagem e a aplicação de MARE em até 16 dBsm, a seção reta de radar geral é menor do que a área de eco da nuvem de chaff protetora." Em resumo, se um navio com um SRR de aproximadamente 44 dBsm passar por um processo de modernização com a implementação da tecnologia stealth, ele pode sofrer uma redução de -16 dBsm. Teoricamente, isso resultaria em uma SRR final de 28 dBsm, o que equivale a menos de 1000 metros quadrados. Isso pode ser visualizado com mais clareza na figura, que ilustra esse estudo.

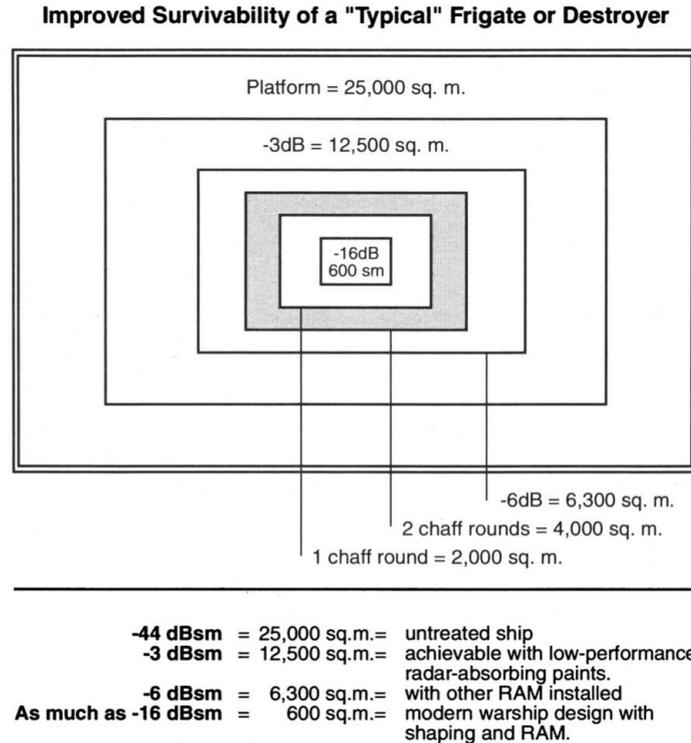


Figura 4.2 – Adaptação do estudo de aplicação do *stealth* para uma típica Fragata ou *Destroyer*
 Fonte: *Stealth Technology in Surface Warships*. (MCGILLVRAY, 1994)

Quando se refere à aplicação do *stealth* em navios de guerra, tem-se por objetivo principal tornar os pontos de detecção da embarcação no radar menores do que o de uma nuvem de chaff, isto é, fazer com que sejam menos suscetíveis à mísseis com radares ativos e desta forma, prover uma melhor capacidade defensiva em “soft kill” (MCGILLVRAY, 1994).

No entanto, mesmo com essas tecnologias de *stealth*, alguns navios, como a classe de barcos de mísseis Type-022 da Marinha Chinesa, são claramente visíveis em imagens de satélite equipadas com radar. Esses barcos, embora projetados com ângulos e revestimentos para desviar ondas de radar, acabam sendo identificados com facilidade quando vistos do espaço, apresentando um desafio significativo à furtividade (Sutton, 2021) conforme ilustrado na figura 4.3.

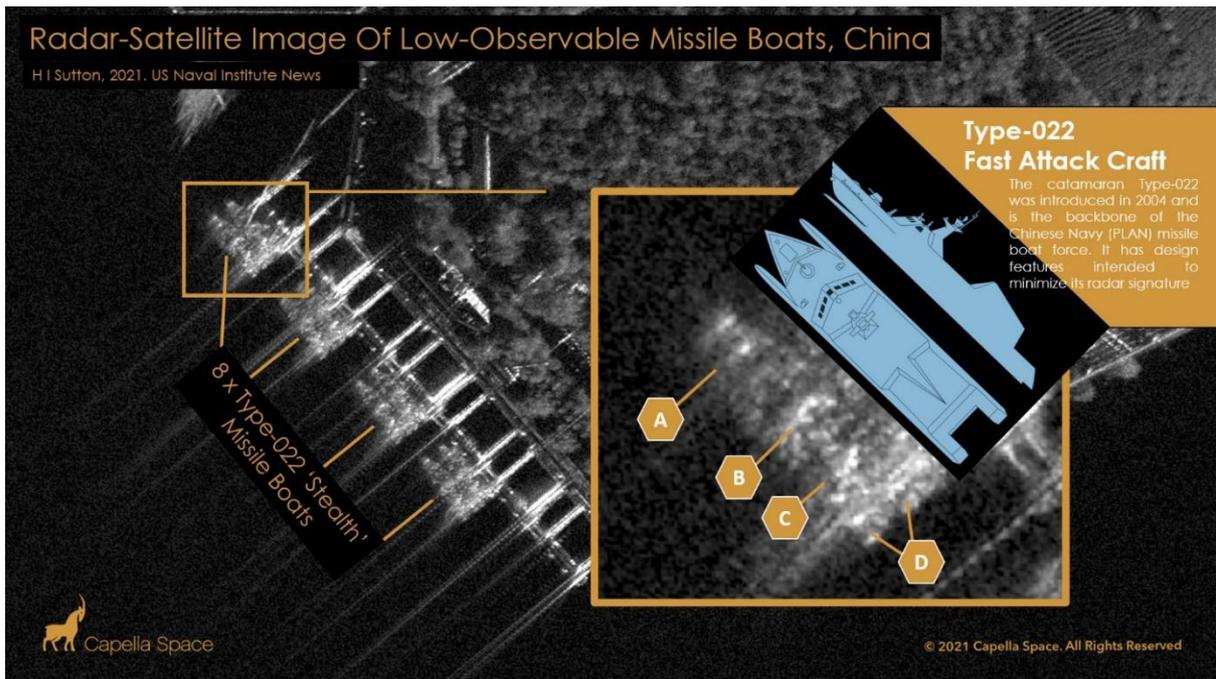


Figura 4.3 - Type-022 é claramente visível nas imagens de satélite de Radar de Abertura Sintética.

Fonte: This is What a Chinese Stealth Warship Looks Like on Radar(Sutton,2021)

Embora popularmente descrito como 'furtivo', o barco de mísseis Type-022 da China é claramente visível em imagens de satélite de Radar de Abertura Sintética (SAR) fornecidas pela Capella Space Inc. A proa (A) é discernível, assim como o mastro (B), lançadores de mísseis (C) e os cascos de catamarã na popa (D). A capacidade de satélites de radar observarem navios de guerra destinados a serem furtivos é uma capacidade que, até recentemente, estava limitada a algumas agências governamentais poderosas em todo o mundo. Mas agora é relativamente fácil de obter (Sutton, 2021).

4.2 Aplicação da furtividade nos meios de superfície

No contexto atual, a busca por estratégias de furtividade em navios de guerra apresenta desafios significativos. O Contra-Almirante Tiudorico (2016) aborda em seu artigo áreas específicas das embarcações que requerem atenção especial na busca pela furtividade. Essas áreas incluem a aplicação de material absorvente de radar (MARE) nas partes mais refletivas do navio e o uso de design assistido por computador (CAD) para otimizar a forma do casco e da superestrutura, evitando superfícies verticais (Tiudorico, 2016) (McGillvray,1994).

Muitos arranjos metálicos de corrimão, armários no convés, acessórios de convés e estruturas de mastros que refletem as emissões de radar e comunicações do próprio navio, causando interferência, estão agora cobertos com um material que absorve radiação

eletromagnética. Isso reduz a energia eletromagnética extraviada nas proximidades das antenas de convés e melhora o desempenho dos receptores de radar e comunicações a bordo (McGillvray, 1994).

Além disso, a forma do casco e da superestrutura da embarcação é projetada de maneira a evitar superfícies verticais. A maior parte da superestrutura é fechada, e o uso de MARE pode ser empregado para reduzir ainda mais a Radar Cross Section (SRR), que é a medida da refletividade do radar (McGillvray, 1994).

Esses princípios visam reduzir a detecção radar e melhorar a furtividade das embarcações militares, tornando-as menos visíveis para radares inimigos. Essas considerações destacam a importância de projetar e construir navios de guerra levando em conta as características que afetam a furtividade, visando melhorar a capacidade de evitar detecção e minimizar riscos em operações militares (McGillvray, 1994).

Vamos usar um modelo 3D do USS Zumwalt disponível na plataforma Sketchfab para ilustrar as características que um navio stealth deve ter. Será explorado o costado do navio, o passadiço, as áreas arredondadas, os cilindros e outros elementos que contribuem para tornar o Zumwalt um exemplo de design stealth em embarcações de guerra segundo o Contra-Almirante Tiudorico (2016). Por intermédio dessas imagens, será possível visualizar e analisar essas características de forma interativa.



Figura 4.4 –Navio USS Zumwalt (DDG-1000) em modelo 3D

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para suportes de plataformas expostas: Deve-se evitar a formação de ângulos retos de 90 graus.

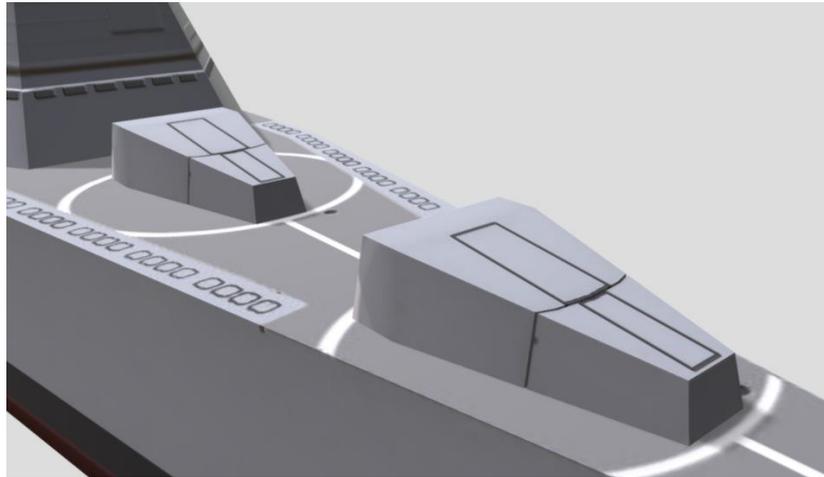


Figura 4.5 – Plataformas expostas do USS Zumwalt (DDG-1000)

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para o interior do passadiço: Vidros transparentes à onda de radar e ângulos retos no interior do passadiço devem ser evitados, pois podem causar reflexões significativas.

Para superfícies verticais: Superfícies verticais, como costados e anteparas externas de superestrutura, devem ser inclinadas de 5° a 6° para evitar grandes reflexões. Essas superfícies também devem ser planas e facetadas para dispersar as ondas radar.



Figura 4.6 – Plataformas expostas do USS Zumwalt (DDG-1000)

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para escadas externas: Deve-se evitar o uso de chapas que criem ângulos retos, como as sanefas.

Para a superfície do costado: A superfície do costado inevitavelmente forma um ângulo com a superfície do mar. Para reduzir a intensificação da SRR (Seção Equivalente de Radar), o costado deve ser inclinado em direção ao plano diametral (para dentro) em 5° a 6° para evitar ângulos retos de 90 graus.



Figura 4.7 – Superfície do costado do USS Zumwalt (DDG-1000)

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para superfícies cilíndricas verticais: Superfícies cilíndricas verticais devem ser evitadas, pois sua simetria permite a identificação de qualquer ângulo de incidência. Pode-se optar por troncos de cone com geratrizes inclinadas e superfícies facetadas.

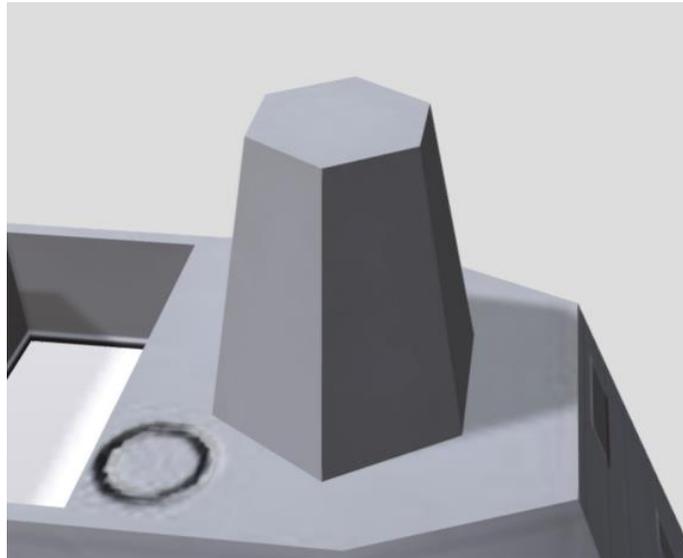


Figura 4.8 – Uma das Superfície facetadas do USS Zumwalt (DDG-1000)

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para superfícies esféricas: Superfícies esféricas também apresentam simetria e devem ser evitadas, embora tenham um valor de SRR menor em comparação com cilindros.

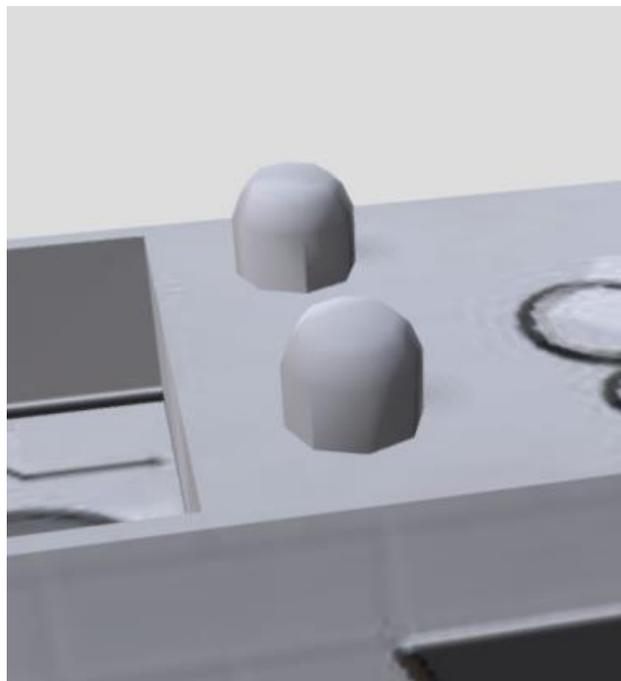


Figura 4.9 – Superfície esférica do USS Zumwalt (DDG-1000)

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para cavidades: Cavidades, como hangares, podem causar reflexões sucessivas. Para mitigar isso, as anteparas laterais e do fundo das cavidades devem ser inclinadas.

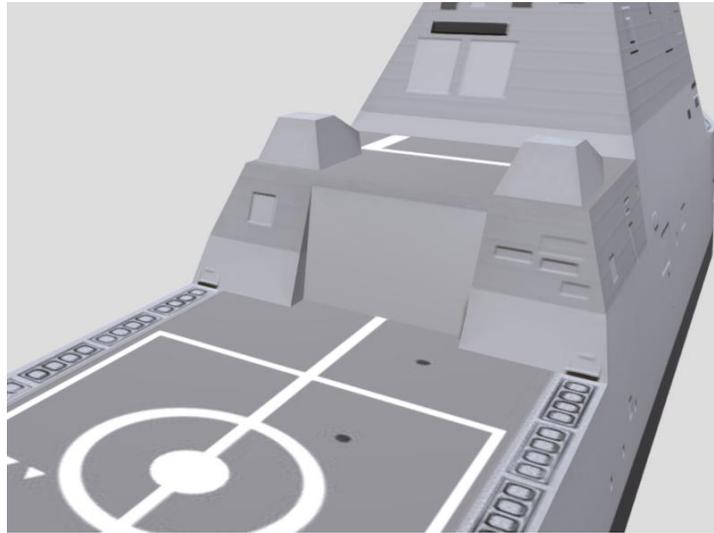


Figura 4.10 – Hangar do USS Zumwalt (DDG-1000)

Fonte: Sketchfab (Yakudami, 2019)

Para balaustradas: Balaustradas são particularmente problemáticas devido aos efeitos de ressonância. Os diâmetros dos balaustres são da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da onda de radar, tornando-os significativos na contribuição para o valor da SRR. Portanto, é importante abordar essas áreas com atenção especial ao design.

Para treliças: Treliças são notáveis contribuintes para o valor da SRR devido aos efeitos de múltiplas reflexões. Portanto, mastros em treliça devem ser evitados e substituídos por mastros fechados e facetados, construídos com estruturas de chapas. Normalmente, as treliças em mastros são adotadas para resolver problemas de vibração estrutural. Caso a utilização de treliças seja necessária por questões de vibração, elas devem ser envolvidas externamente por estruturas de chapas. Isso permite conciliar a redução da SRR com a resolução dos problemas de vibração estrutural.

Obviamente, para navios já construídos, a incorporação da tecnologia stealth é em grande parte restrita à instalação de MARE. Nesse contexto, a tecnologia stealth emergente está produzindo hoje uma variedade de materiais absorventes de radar novos e cada vez mais eficazes, incluindo "MARE estrutural" e MARE com características de supressão de IR. (McGillvray, 1994) Esses princípios visam reduzir a detecção radar e melhorar a furtividade das embarcações militares. (Adaptado de Tiudorico, 2016)

Essas considerações destacam a importância de projetar e construir navios de guerra levando em conta as características que afetam a furtividade, visando melhorar a capacidade de evitar detecção e minimizar riscos em operações militares (McGillvray, 1994). Além das estruturas

mencionadas acima, de acordo com W. McGillvray (1994), é afirmado que todas as seguintes "assinaturas" visíveis também devem ser prevenidas para evitar a exposição do meio à detecção inimiga, por exemplo, a Assinatura Acústica no que tange aos sons gerados pelas máquinas que são emitidos a partir do casco para a água. Portanto, é necessário realizar esforços abrangentes para instalar dispositivos que encubram essa característica sonora.

O elemento-chave nas capacidades de stealth da Corveta Visby, por exemplo, é o uso de propulsão a jato d'água, que foi preferida em relação às hélices tradicionais. A decisão foi motivada por uma série de incursões de submarinos estrangeiros nas águas nacionais da Suécia no meio dos anos 1980. Isso destacou a necessidade de criar uma embarcação anti-submarina e caça-minas que pudesse operar perto de sua costa (Naval Technology, 2009).



Figura 4.11 – Propulsão a Hidrojato da Corveta Visby

Fonte: *Visby Class Corvettes* (NAVAL TECHNOLOGY, 2020)

Patric Hjorth, gerente técnico da Administração de Material de Defesa Sueca (FMV), o contratante principal do programa Visby, diz: "É muito difícil para um submarino detectar uma embarcação a jato d'água. Ela tem uma assinatura muito diferente de uma embarcação movida a hélice, pois se dissipa no fundo. Elas também são muito boas para fazer curvas fechadas e paradas rápidas, proporcionando muito mais manobrabilidade (Naval Technology, 2009).

Além disso, os plásticos e fibras de carbono usados no casco composto para dar-lhe propriedades de stealth também ajudam a tornar a embarcação muito leve. O Visby desloca 600 toneladas de água, cerca da metade do peso de uma corveta convencional com casco de aço, e esse foi um parâmetro de design que levou a outra razão para escolher jatos d'água. Eles produzem uma

assinatura hidroacústica baixa em qualquer caso - cerca de 10-15 dB a menos do que um equivalente movido a hélice. Essa redução na assinatura hidroacústica contribui para a capacidade stealth da embarcação (Naval Technology, 2009).

Portanto, a combinação do uso de jatos d'água para propulsão, o casco leve de plástico e fibra de carbono, e a redução na assinatura hidroacústica tornam o Visby altamente eficaz em operações furtivas e manobras ágeis, características essenciais para sua missão em águas costeiras e complexas (Naval Technology, 2009). Além dessas assinaturas mencionadas acima McGillvray também cita algumas outras como:

Eletrônica: causada por emissores eletrônicos ativos irradiando na atmosfera. Esta assinatura pode ser silenciada desligando os equipamentos (EMCON); no entanto, o navio perde suas capacidades de detecção ativa e comunicações por rádio (McGillvray, 1994).

Visual: causada pelo fato de que um navio grande é visível a olho nu durante o dia. O rastro de um navio é visualmente detectável do ar e do espaço; o rastro tem uma persistência surpreendentemente longa. Pouco pode ser feito para alterar a assinatura visual de um navio durante o dia, além da melhoria dos esquemas de pintura já em uso. Planejadores operacionais não podem depender das condições climáticas para mascarar a assinatura visual, a menos que o navio opere extensivamente em áreas propensas a nevoeiro ou clima inclemente. Eles podem planejar operações noturnas para negar ao inimigo uma detecção visual (McGillvray, 1994).

Infravermelho (IV): causada pela radiação térmica no espectro eletromagnético, particularmente na região de IV Médio (MIR). Essa região corresponde a uma temperatura da fonte de calor entre 500 e 1.100 graus Kelvin. "Fontes quentes (tomadas de exaustão e gases de exaustão) com temperaturas na região de 750 graus Kelvin irradiam intensamente na região de MIR.... De fato, o nível de radiação de IV nessas áreas é tão alto que o que equivale a dois por cento da área total do navio pode produzir 99 por cento da assinatura total de IV do navio." É importante notar que são essas fontes de MIR concentradas que servem para atrair mísseis anti-navio com buscadores de IV ou de duplo modo (IV/radar). Pesquisas extensas estão atualmente direcionadas para mascarar a fonte de calor concentrada dos gases de escape das máquinas (McGillvray, 1994).

4.3 Vantagens e Limitações do uso da furtividade em navios

Como citado anteriormente, para além da configuração geométrica da embarcação, uma estratégia adicional para diminuir sua SRR e, assim, torná-la menos detectável por radares de busca, é aplicar materiais absorventes na sua estrutura. Dessa maneira, o navio se torna um alvo com uma SRR reduzida, pois absorve mais e reflete menos as ondas eletromagnéticas que incidem sobre ele. Essa abordagem proporciona a vantagem de ser detectável apenas em curtas distâncias.

Um SRR diminuído para um navio equipado com CME é especialmente vantajoso. Quando um míssil é bloqueado por um CME de um adversário, há uma distância de "burn-through" na qual a energia do radar refletida de volta para o míssil ultrapassa a potência do sistema interferente (jammer). Nesse ponto, a CME se torna ineficaz, permitindo que o míssil detecte o alvo. Através do uso de stealth, menos energia proveniente do radar inimigo é refletida, o que torna o bloqueador de bordo mais eficaz e reduz a distância de "burn-through" próximo ao navio, proporcionando menos tempo e área de manobra para o míssil (MCGILLVRAY, 1994).

Apesar de suas vantagens, a tecnologia stealth não é uma solução infalível. A redução na detecção pode representar um risco à segurança da embarcação durante manobras, especialmente em áreas com alto tráfego e baixa visibilidade. Para contornar esse problema, podem ser utilizados refletores portáteis, repetidores eletrônicos ou intensificadores de "blip" para aumentar a SRR. Além disso, o uso de MARE pode aumentar o peso acima do centro de gravidade do navio, afetando negativamente sua estabilidade e capacidade de navegação (MCGILLVRAY, 1994). No entanto, para superar esse desafio, os centros de pesquisa estão explorando novos materiais mais leves e tecnologias para o desenvolvimento de MARE, como o uso de compósitos com fibras de carbono, nanotubos de carbono, grafeno e metamateriais.

5 Caracterização e Aplicações de Compósitos Poliméricos de Ferrita-Policloropreno com Alto Teor de Absorção de Micro-ondas

Como relatado no primeiro parágrafo do item 4.2, a aplicação de material absorvedor radar nas partes de maior reflexão da plataforma naval, contribui para a diminuição de sua SRR. Desta forma, o objetivo desta seção é a caracterização eletromagnética de um material absorvedor e avaliar o seu poder de absorção da onda eletromagnética incidente.

O material absorvedor estudado neste TCC é composto por um óxido de diferentes metais disperso em uma matriz de polimérica. Neste estudo, este material será denominado de ferrita. Este compósito absorvedor é oriundo de pesquisas realizadas na Divisão de Cerâmicas Avançadas do Grupo de Tecnologia de Materiais do Instituto de Pesquisas da Marinha.

Foram realizadas medidas por guia de ondas, a partir de dados de espalhamento obtidos por intermédio do emprego de analisador de rede. As equações que relacionam os dados de espalhamento com a permeabilidade e permissividade do material seguiram o algoritmo de Nicolson-Ross. Desta forma, o equipamento utilizado para a caracterização eletromagnética foi o Analisador Vetorial de Rede (N5232A 300kHz to 20 GHz PNA-L network analyser) da Keysight (Figura 5.1). Este equipamento possibilita avaliação da absorção de radiação eletromagnética, na faixa de micro-ondas, dos corpos de prova em guia de ondas retangular e cabo coaxial a partir de medidas de permeabilidade e permissividade destes materiais em função da frequência.

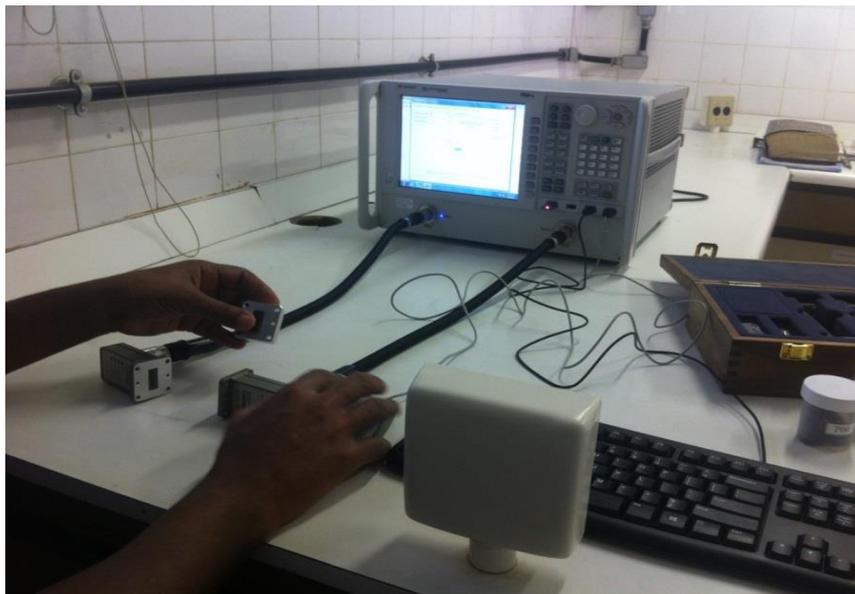


Figura 5.1 – Analisador Vetorial de Rede (N5232A 300kHz to 20 GHz PNA-L network analyser) da Keysight

Fonte: Foto tirada pelo próprio Autor no IPqM.

Dependendo da faixa de frequência, o guia de ondas e conseqüentemente o porta amostra utilizado deve possuir uma determinada dimensão. O porta amostra pertinente a faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz (banda X) é mostrado na Figura 5.2.

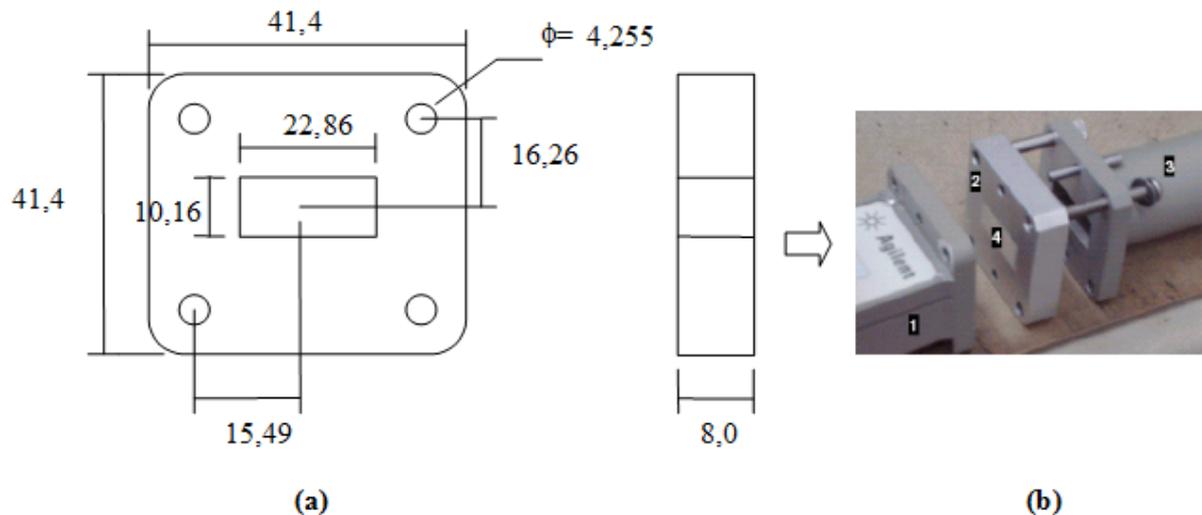


Figura 5.2 - Porta amostra. (a) Dimensões do porta amostra em milímetros, (b) Foto do porta amostra com corpo de prova sendo: 1 – acoplador da porta 1; 2 – porta amostra; 3 – trecho de guia de ondas da porta 2 e 4 – corpo de prova.

Fonte: Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ (2007).

5.1 Propriedades Eletromagnéticas do Compósito

5.1.1 - Permissividade complexa na banda X

A ferrita: policloropreno foi avaliado quanto à propriedade elétrica de permissividade na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz (banda X), conforme ilustra a Figura 5.3.

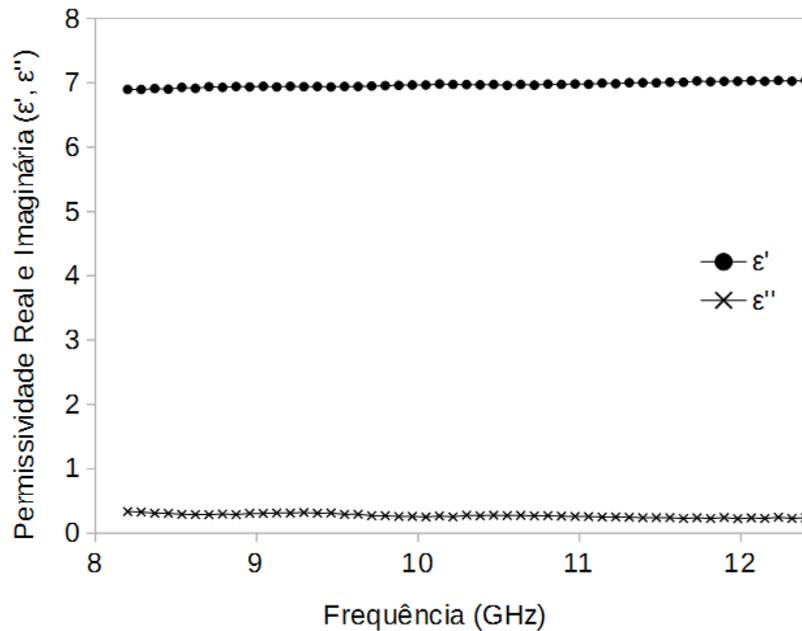


Figura 5.3 –Permissividade na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz

Fonte: Gráfico gerado pelo autor e convertido em figura pelo próprio Autor no IPqM.

A parte real da permissividade complexa, também chamada de constante dielétrica, está relacionada com o armazenamento de energia elétrica e a parte imaginária com a sua dissipação. Para o compósito à base de ferrita, os valores referentes à parte real (ϵ') e imaginária (ϵ'') da permissividade complexa permaneceram praticamente constantes, para toda a faixa de frequência analisada.

5.1.2 - Permeabilidade complexa na banda X

A Figura de k apresenta o gráfico da permeabilidade complexa do compósito polimérico das ferrita:policloropreno. forma análoga à permissividade complexa, a parte real da permeabilidade complexa, está relacionada com o armazenamento de energia magnética e sua parte imaginária com a dissipação desta energia.

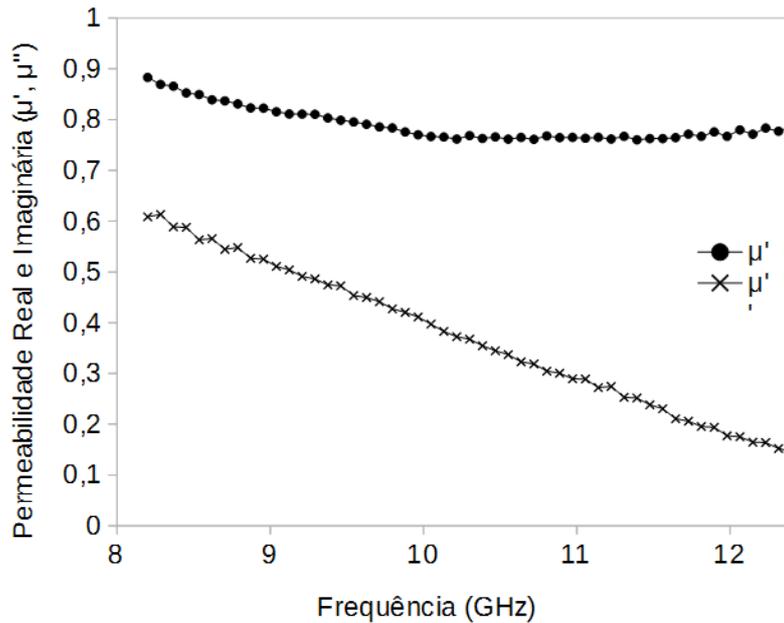


Figura 5.4 – Permeabilidade real e imaginária da ferrita

Fonte: Gráfico gerado pelo autor e convertido em figura pelo próprio Autor no IPqM.

Os compósitos poliméricos das ferritas estudadas possuem comportamento próximo do linear com um pequeno decaimento nos valores de permeabilidade real, com o aumento da frequência da onda eletromagnética. Segundo NAITO, 1971, a permeabilidade complexa pode apresentar dispersão do tipo relaxação ou ressonância. Na relaxação, a parte real da permeabilidade é inicialmente alta e decai lentamente com o aumento da frequência. A relaxação da magnetização está relacionada com o amortecimento da precessão do spin durante o movimento da parede magnética. Quanto maior o amortecimento da precessão, maior será a perda magnética na ferrita e maior será a absorção de micro-ondas. GLOBUS, 1977, afirma que mesmo no mecanismo de ressonância há contribuição da relaxação. É possível observar, pelas curvas pertinentes aos valores da permeabilidade imaginária que elas contribuem significativamente para a absorção de micro-ondas dos compósitos poliméricos.

5.1.3 - Medida de Refletividade do Compósito

As Figura 5.5 mostra o resultado da análise de refletividade do compósito polimérico para diferentes espessuras.

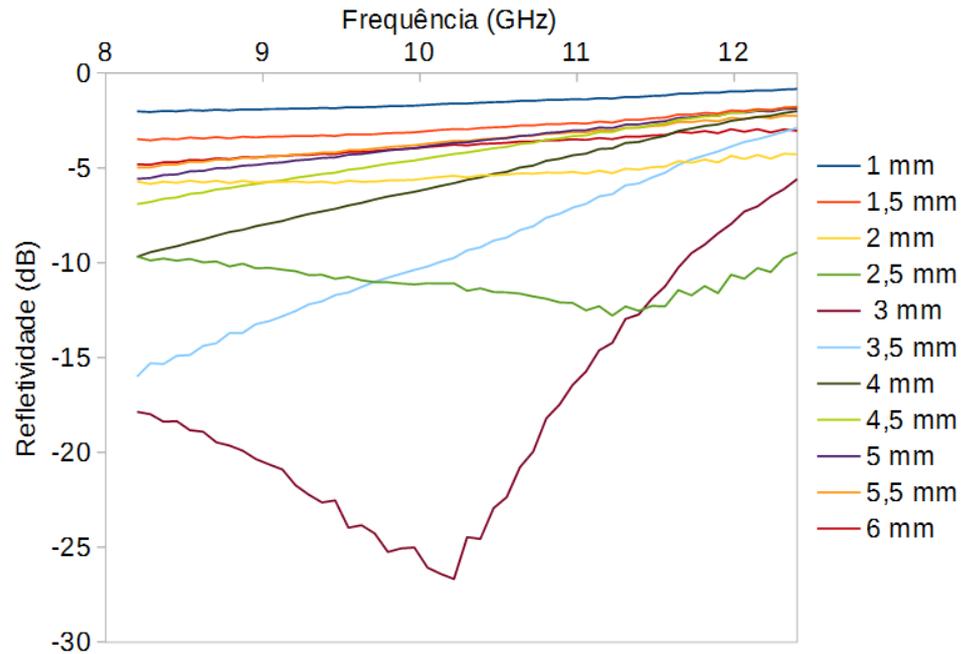


Figura 5.5 – Curvas de Refletividade do composto Óxidos metálicos:policloropreno obtidas na banda X com diferentes espessuras

Fonte: Gráfico gerado pelo autor e convertido em figura pelo próprio Autor no IPqM.

Pelo perfil das curvas de refletividade observa-se uma tendência de maior atenuação das ondas eletromagnéticas, em frequências próximas a 10 GHz. Todas as curvas de refletividade acima apresentam pico de absorção com magnitude inferior a 20 db apontando para uma possível utilização como dispositivo absorvedor de radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas. Também pode ser observado que os melhores resultados são atribuídos a espessura de 3mm.

6 Situação atual

Com o mais recente empreendimento das Fragatas da Classe Tamandaré, em fase de desenvolvimento, o IPqM planeja, contando com a colaboração do CTEX (Centro de Tecnologia do Exército), por intermédio de um software que calcula a SRR, identificar os pontos de maior refletividade das Fragatas e, realizar o recobrimento dessas áreas com MAREs desenvolvidos pela Marinha do Brasil.

O Grupo de Tecnologia de Materiais (GTM) do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) tem se dedicado ao desenvolvimento de tecnologias para a Defesa Nacional, e uma das áreas de pesquisa refere-se a Pesquisa e desenvolvimento de materiais que possam tornar as embarcações menos detectáveis pelos radares inimigos.

Nesse contexto, o GTM desenvolveu uma tinta especial que absorve micro-ondas. Este trabalho foi concluído em 2003, chamado na época de projeto TAM X. Essa tinta foi criada em parceria com a AVIBRAS, empresa especializada em tecnologia aeroespacial e de defesa. O IPqM ficou responsável por desenvolver o pigmento antirradar, enquanto a AVIBRAS transformou esse pigmento em uma tinta aplicável nas embarcações.

A tinta absorvedora de micro-ondas foi submetida a testes laboratoriais e demonstrou um alto poder de absorção, superior a 90%, em toda a faixa de frequência X (8,2 a 12,4 GHz). Na frequência específica de 9 GHz, a absorção chegou a impressionantes 99,97%. Isso significa que a tinta é capaz de absorver quase toda a energia das ondas de radar, tornando as embarcações muito menos visíveis para os radares inimigos.

Além dos testes em laboratório, foi realizado um teste operacional envolvendo o submarino Tapajó da Classe Tupi e uma aeronave equipada com um radar Sea-spray 3000. Durante esse teste, foi observado que o mastro não revestido do submarino podia ser detectado pelo radar em uma distância entre 4 e 7 milhas, enquanto o mastro revestido com a tinta absorvedora não pôde ser localizado pelo radar. A estrutura pintada só foi visualmente encontrada a uma distância aproximada de 400 jardas, demonstrando a eficácia da tinta em tornar as embarcações menos visíveis para os radares.

Além da tinta absorvedora, o GTM também trabalhou em outro projeto em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para desenvolver placas absorvedoras compostas por materiais absorvedores veiculados em uma matriz polimérica. Essas placas são adesivas e podem ser aplicadas nas superfícies das embarcações, proporcionando um efeito similar ao da tinta absorvedora. Essas placas são especialmente úteis em superfícies planas, como as das superestruturas de navios.

Esses avanços tecnológicos têm sido importantes para aumentar a discrição radar das embarcações militares, tornando-as menos detectáveis pelos inimigos. Isso contribui para a segurança e eficácia das operações navais realizadas pela Marinha do Brasil.

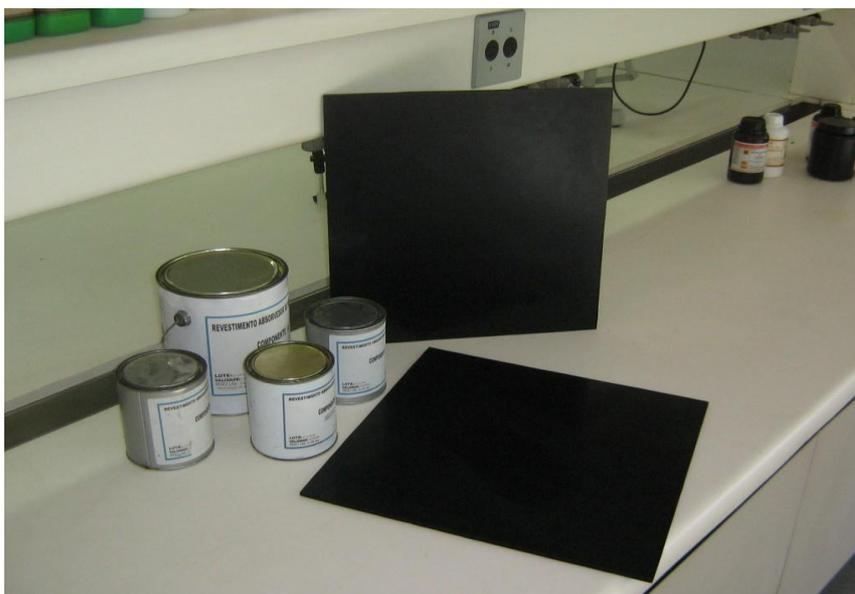


Figura 6.1 – Tintas e placas absorventes de radiação eletromagnética desenvolvidas pelo IPqM

Fonte: Estudo sobre a possibilidade de emprego da tecnologia Stealth nos meios navais (MELO, 2022)

7 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, exploramos detalhadamente os avanços e as complexidades associadas à aplicação da tecnologia stealth em meios navais, enfatizando a importância de estratégias eficazes de redução de assinaturas eletromagnéticas para a segurança e eficácia das operações marítimas. A análise aprofundada das características dos materiais absorvedores revelou sua contribuição significativa para a minimização da detecção por radar e para a melhoria da furtividade das embarcações.

Além disso, discutimos os desafios e limitações inerentes à implementação da tecnologia stealth, destacando a necessidade de equilibrar a redução da assinatura radar com considerações de estabilidade e manobrabilidade das embarcações em cenários operacionais variados. A importância de estratégias complementares, como contramedidas eletrônicas e o uso de novos materiais de absorção, foi ressaltada para aprimorar a eficácia global da tecnologia stealth.

Nossas descobertas enfatizam a importância de uma abordagem integrada e colaborativa, envolvendo instituições de pesquisa, indústrias navais e órgãos de defesa, para impulsionar a inovação contínua e promover avanços significativos na implementação bem-sucedida da tecnologia stealth em ambientes marítimos desafiadores. A valorização da pesquisa contínua e do desenvolvimento de materiais avançados será crucial para fortalecer as capacidades de defesa e segurança naval em face de ameaças emergentes e em evolução.

Além disso constatou-se, por intermédio da caracterização eletromagnética, que o Material Absorvedor estudado tem a capacidade de absorver mais de 99% da onda eletromagnética incidente. Desta forma, com elevada possibilidade de ser utilizado para minimizar a SRR de plataformas militares navais.

7.1 Considerações Finais

Ao longo deste estudo, foi possível compreender a importância e a complexidade da implementação da tecnologia stealth em meios navais, especialmente no contexto de operações de defesa e segurança. A revisão abrangente da literatura destacou os avanços significativos alcançados no desenvolvimento de materiais absorvedores e estratégias de redução de SRR, demonstrando seu impacto positivo na eficácia operacional das embarcações.

No entanto, é fundamental reconhecer que a tecnologia stealth apresenta desafios e limitações que exigem atenção contínua e esforços de pesquisa para garantir sua aplicabilidade

prática. A necessidade de equilibrar a redução de detecção com a segurança operacional e a estabilidade das embarcações ressalta a importância de abordagens multidisciplinares e inovações constantes no campo de materiais absorvedores e tecnologia de radar.

À luz dessas considerações, recomenda-se uma abordagem integrada que combine o desenvolvimento contínuo de materiais absorvedores avançados com o aprimoramento de técnicas de design e a aplicação de estratégias de contramedidas eletrônicas eficazes. O fortalecimento da colaboração entre instituições de pesquisa, indústrias navais e órgãos de defesa pode impulsionar ainda mais o progresso na implementação bem-sucedida da tecnologia *stealth*, fortalecendo assim a capacidade de defesa e segurança naval em ambientes desafiadores e dinâmicos nações não se furtam em empenhar recursos financeiros para sua pesquisa e aplicação. Desta forma, apresentam uma Marinha mais preparada e modernizada.

No entanto, é importante mencionar que a Guerra Eletrônica necessita passar frequentemente por revisões, face a constante evolução tecnológica que acarreta um impulsionamento frequente em tentar superar a tecnologia que se encontra em vanguarda.

Por não ser possível prever tais acontecimentos, torna-se extremamente necessário o investimento em P&D, para que, desta forma, busque-se uma maior autonomia no setor de defesa e, conseqüentemente, uma maior independência frente às grandes potências detentoras das tecnologias de ponta.

7.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Apesar da tecnologia *stealth* não ser novidade e já ser empregada a um tempo considerável pelas Marinhas mais modernas, sua utilização ainda não se tornou obsoleta, sendo ainda bastante desenvolvida nos meios militares.

Muitos projetos ligados a essa tecnologia ainda passam por teorias e experimentos laboratoriais. Além disso, devido à sua eficácia, já existem iniciativas para desenvolvimento de contramedidas à essas ameaças. Portanto, sugere-se para futuros trabalhos temas mais aprofundados em algumas áreas como: Certamente, com a contínua evolução do campo da inteligência militar, é crucial considerar a interseção entre estratégias de coleta de informações avançadas e a proteção eficaz de dados sensíveis contra ameaças cibernéticas e de hackers. Sendo assim, para futuras investigações, é recomendável explorar tópicos que abordam a convergência entre tecnologia *stealth* e segurança cibernética, tais como:

- A aplicação de inteligência artificial na análise de dados de inteligência para identificar padrões e tendências no campo da furtividade;
- Estratégias abrangentes de segurança cibernética adaptadas especificamente para proteger dados e informações sensíveis relacionadas à tecnologia stealth;
- O papel dos hackers na avaliação de vulnerabilidades potenciais em sistemas de tecnologia stealth e as medidas preventivas necessárias para mitigar essas ameaças;
- A importância crescente da criptografia avançada na proteção de comunicações confidenciais e dados relacionados a operações furtivas;
- A integração de sistemas de vigilância avançados e técnicas de reconhecimento para fortalecer a coleta de informações em tempo real e aumentar a consciência situacional em operações furtivas.

Esses tópicos representam áreas críticas que podem impulsionar ainda mais a eficácia das operações furtivas e da segurança cibernética em ambientes militares altamente tecnológicos.

8 REFERÊNCIAS

AGARWALA, N. **Integrated masts – The next generation design for naval masts.** **DEFENCYCLOPEDIA**, 2015. Disponível em: <<https://defencyclopedia.com/2015/08/28/integrated-masts-the-next-generation-design-for-naval-masts/>>. Acesso em: 9 abr. 2022.

Advani, S. S. (2019, janeiro). **Significant Developments in Naval Technologies on Surface Ships.** SPS Naval Forces, 01-2019. Obtido de <<https://www.spsnavalforces.com/story/?id=615&h=Significant-Developments-in-Naval-Technologies-on-Surface-Ships>>. Acesso em: 04. Jun . 2023

BARBOZA, T. L. **Princípios Da Tecnologia Stealth.** *Revista Marítima Brasileira*, v. 136, n. 10/12, out./jun. 2016, p. 59 -72.

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK (CIAW). CIAW-326 **Apostila Radar.** Rio de Janeiro, 2002.

CETENO, G. **China pode estar desenvolvendo uma versão stealth de sua cópia do Black Hawk.** 2022. Disponível em: <https://www.aeroflap.com.br/china-pode-estar-desenvolvendo-uma-versao-stealth-de-sua-copia-do-black-hawk/#:~:text=A%20China%20poderia%20estar%20desenvolvendo,o%20projetista%2Dchefe%20da%20aeronave>. Acesso em: 4 abr. 2022.

Christensen, C. M. (1997). **The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail.** Obtido de Harvard Business Review Press. <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=46> . Acesso em: 22. Jun . 2023.

CORREL, J. T. **History of Stealth: From Out of the Shadows.** *Airforce Magazine*, Virginia, 2019. Disponível em: <https://www.airforcemag.com/article/history-of-stealth-from-out-of-the-shadows/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

CORVETAS (Classe Barroso). *Marinha do Brasil*, s.d. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/corvetas-classe-barroso>. Acesso em: 4 abr. 2022.

DIAMOND, J. **Armas Germe e Aço: Os Destinos das Sociedades Humanas**. 19ª ed. rev. Rio de Janeiro: Record, 2017. 689 p. ISBN 978-85-01-11281-1.

FRIEDE, R. **Invisibilidade e Furtividade: a Gênese da Tecnologia Stealth**. Defesanet, 2018. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/tecdi/noticia/30875/Reis-Friede---Invisibilidade-e-Furtividade--a-Genese-da-Tecnologia-Stealth/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

GALANTE, A. (2018, 7 de maio). **Radar quântico – fim do stealth?** *Aéreo - Notícias de Defesa e Indústria*. Acesso em: <<https://www.aereo.jor.br/2018/05/07/radar-quantico-fim-do-stealth/>> Acesso em: 21 mar. 2023.

GONÇALVES, V. F. M. **Materiais Compósitos Estruturais Atenuadores de Radiação Eletromagnética (8,2-12,4 GHZ)**. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4988/1/2%C2%BA%20Lugar%20-%20Melhor%20Monografia.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2023.

John. (1996, March 23). **The U-2's Intended Successor: Project Oxcart, 1956-1968**. Recuperado de: <http://www.blackbirds.net/sr71/oxcart/successortou2.html>. Acesso em: 24. Jun . 2023

KUMAR, N., & DIXIT, A. **Nanotecnologia para Aplicações de Defesa**. Cham: Springer International Publishing, 2019.

Larter, D. B. (7 de maio de 2019). **The US Navy is eyeing a big change to its new stealth destroyers**. *Defense News*. Disponível em: <https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/navy-league/2019/05/07/the-us-navy-is-eyeing-a-big-change-to-its-new-stealth-destroyers/>. Acesso em: 24. Jun . 2023

LOCKHEED MARTIN. **Sea Shadow**. Disponível em: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/history/sea-shadow.html>. Acesso em: 01 out. 2020.

MCGILLVRAY, John W. **Stealth Technology in Surface Warships**. U.S. Naval War College, v. 47, n. 4, 1994.

MIRANDA, Erasmus Couto Brazil. **O Problema das Antenas Embarcadas**. 22 out. 2021. 39 slides. Material apresentado para a disciplina de Antenas, Propagação e Interações Atmosféricas (API) no curso de Guerra Eletrônica da Marinha do Brasil.

MONTI, A., ALÙ, A., TOSCANO, A., & BILOTTI, F. **Invisibilidade óptica por meio de metassuperfícies feitas de nanopartículas plasmônicas.** *Journal of Applied Physics*, 117(12), 123103, 2015.

NA HORA DA GUERRA. GUERRA Eletrônica #22 - **Seção Reta Radar. Direção: Luis Felipe de Moura Nohra. Fotografia: Gabriel Brandão Nohra.** NA HORA DA GUERRA, 2022. 1 vídeo (5m20s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=5wAvVSdxLGg&list=PLnsgZysUDpBa3Do-ERhn0YVVue8oxjlaNo&index=2>>. Acesso em: 21 mar. 2023.

NAVANTIA. **Submarino S-80Plus.** Disponível em: <https://www.navantia.es/es/productos/s-80/>. Acesso em: 21 mar. 2023.

NOHARA, E. L. **Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos.** Tese Ph.D. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, 2003.

NOHARA, L. F. M.; RICCI, A. S.; SOETHE, V. L.; FONTANA, L. C. **Radar cross section of a stealth aircraft.** *Progress In Electromagnetics Research*, v. 50, p. 61-82, 2004.

OLIVEIRA, L. C. T. et al. **Tecnologia furtiva em aeronaves e embarcações militares.** São José dos Campos: INPE, 2018. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/01.19.13.19/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2023.

PADILHA, Luiz. **Submarino A26 – Tecnologia stealth em alto nível.** [S.l.]: Defesa Aérea & Naval, 7 out. 2021b. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/submarino-a26-tecnologia-stealth-em-alto-nivel>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PESCE, Giovanni. **O Desenvolvimento De Tecnologias De Caráter Dual Pela Indústria De Defesa Brasileira: Desafios E Oportunidades Para A Marinha Brasileira: A importância estratégica de uma política de uso dual na Indústria de Defesa Brasileira, seus desafios e suas oportunidades para a Marinha do Brasil (MB).** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Política e Estratégia Marítimas) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2019.

Poteat, G. (2014). **Stealth, Countermeasures, and ELINT, 1960-1975** (U). obtido de: https://www.cia.gov/readingroom/docs/DOC_0006122549.pdf Acesso em: 24. Jun . 2023

QUANTUM radar will expose stealth aircraft: **New \$2.7 million project funded by Department of National Defence will develop technology for quantum radar.** Canada: INSTITUTE FOR QUANTUM COMPUTING, 12 abr. 2018. Disponível em: <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/news/quantum-radar-will-expose-stealth-aircraft>. Acesso em: 13 abr. 2023.

R. Fangueiro & S. Rana (Eds.), **Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications** - From Science to Market. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/418195867/Fangueiro-Rana-2016-Natural-Fibres-Advances-in-Science>> . Acessado em 15 de junho.

RESEARCHGATE. **Antena arrays on integrated mast.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/363816874/figure/fig1/AS:11431281175940304@1689957045230/Antenna-arrays-on-integrated-mast.png>. Acesso em: 21 mar. 2023.

RICHARDS, G. (2009, February 4). **Waterjets Propel Sweden's Visby to Success.** Naval Technology. <<https://www.naval-technology.com/features/feature49549/?cf-view&cf-closed>> /. Acesso em: 30 mar. 2022.

RIES, Uilian. **A Tecnologia Stealth Debaixo da Água.** [S.l.]: Hoje no Mundo Militar, 13 dez. 2019. Disponível em: <https://hojenomundomilitar.com.br/a-tecnologia-stealth-debaixo-da-agua/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

RIO exhibe um surpreendente conjunto de centros de pesquisa ligados à Marinha, ao Exército e à Aeronáutica: Rio - Capital militar do país. [S. l.]: Defesanet, 11 jul. 2011. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/tecnologia/noticia/1823/Rio-exibe-um-surpreendente-conjunto-de-centros-de-pesquisa-ligados-a-Marinha--ao-Exercito-e-a-Aeronautica/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

Roblin, S. (2016, October 21). **The SR-71 Blackbird: The Super Spy Plane That Outran Missiles.** Disponível em : <https://nationalinterest.org/blog/the-sr-71-blackbird-the-super-spy-plane-outran-missiles-18142>. Acesso em: 24. Jun . 2023

SANTOS, J. M. et al. **Aplicações práticas de tecnologia stealth em navios militares.** São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc->

m21c/2019/05.21.13.55/doc/publicacao.pdf. Acesso em: 21 mar. 2023.

SAVILLE, P. **Fabrication of Organic Radar Absorbing Materials: A Report on the TIF Project** (Technical Report No. DRDC Atlantic TR 2005-124). May, 2005.

SCHULZ, Peter A. B.. **Nanociência de baixo custo, Física na Escola, v. 8, n. 1, 2008**. Disponível em : <<https://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num1/v08n01a02.pdf>> . Acessado em: 12. maio. 2023.

SCHWERZ, Jorge Luiz. **Proposição De Método De Medição De Seção Reta Radar De Aeronaves. Orientador: Mirabel Cerqueira Rezende. 2004**. 205 p. Pós-graduação em Engenharia Eletrônica e Computação na Área de Microondas e Optoeletrônica (Mestre em Ciência) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

SHARON, M., RODRIGUEZ, S. A. L., & SHARON, C. **Nanotecnologia na indústria de defesa**. Wiley-Scrivener, 2019.

SILVA, Valdirene Aparecida da; PEREIRA, José Jesus; NOHARA, Evandro Luís; REZENDE, Mirabel Cerqueira. **Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de microondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La**. Journal of Aerospace Technology and Management, [S. l.], ano 2009, v. 1, n. 2, p. 255-263, 6 nov. 2009. DOI 10.5028/jatm.2009.0102255263. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jatm/a/YLtT3HcmstRqFjkvcyFXQCr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 9 abr. 2022.

SIKORSKY UH-60 “Black Hawk”. [S.l.]: **Hoje no Mundo Militar**, 2018. 1 vídeo (7m49s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SfFpbVwD2k0>. Acesso em: 30. Mar. 2022.

SILVA, S. M. L. **Filme Fino de Fe-Cr-Al: Análise Experimental de Interações com Microondas, Morfologia e Microestrutura**. Disponível em: https://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_4_tri_2012/RMCT_076_E4B_11.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.

SMITH, J. K. **Design of Microwave Absorbers Using Tschebyshev Transformer Technique**. *Journal of Electromagnetic Engineering*, 23(4), 321-335, 1998.

SOETHE. V. L.; NOHARA. E. L.; FONTANA. L. C.; REZENDE. M. C. **Radar absorbing**

materials based on titanium thin film obtained by sputtering technique. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 3, no. 3, pp. 279–286, 2011.

Spalding, R. (2019). **Stealth War: How China Took Over While America's Elite Slept.** (Brigadier General, US Air Force, Retired). Acesso em: 22. Jun . 2023.

SUTTON, H. I. **Isto é como se parece um Navio de Guerra Chinês Furtivo no Radar.** USNI News, 2021. Disponível em: <https://news.usni.org/2021/09/27/this-is-what-a-chinese-stealth-warship-looks-like-on-radar>. Acesso em: 21 mar. 2023.

Staff Writer. (Última edição: 19 de julho de 2017). **Sea Shadow (IX-529).** Military Factory. Recuperado de: https://www.militaryfactory.com/ships/detail.php?ship_id=Sea-Shadow-IX529#specifications.

SUTTON, H. I. **Isto é como se parece um Navio de Guerra Chinês Furtivo no Radar.** USNI News, 2021. Disponível em: <https://news.usni.org/2021/09/27/this-is-what-a-chinese-stealth-warship-looks-like-on-radar>. Acesso em: 21 mar. 2023.

THE DRIVE. RF-IR Stealth (Techniques/Benefits). [S.l.]: Aircraft 101, 4 mar. 2016. Disponível em: <https://basicsaboutaerodynamicsandavionics.wordpress.com/2016/03/04/stealth-techniques-and-benefits/>. Acesso em: 18 mar. 2022.

THE DRIVE. ZIKIDIS, Konstantinos; SKONDRAS, Alexios; TOKAS, Charisios. **Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies.** *Journal of Computations & Modelling, Attica*, ano 2014, v. 4, n. 1, p. 129-165, 2014. Disponível em: <https://www.thedrive.com/the-war-zone>.

Zhang, H., Wang, J., Han, Y., Liu, C., Zhu, R., Liu, T., ... Qu, S. (2022, 24 de setembro). **Metasurface-enabled isolation between antenna arrays.** *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1002/mmce.23436>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Antenna-arrays-on-integrated-mast_fig1_363816874> Acesso em: 24. Jun . 2023

ZHANG, Y., XU, H., & ZHANG, B. **Design, implementação e extensão de capas de invisibilidade térmica.** *AIP Advances*, 5(5), 053402, 2015.

BARBOZA, T. L. **Princípios Da Tecnologia Stealth**. *Revista Marítima Brasileira*, v. 136, n. 10/12, out./jun. 2016, p. 59 -72.

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK (CIAW). **CIAW-326 Apostila Radar**. Rio de Janeiro, 2002.

Lima Neto, E. R. (2013, dezembro). **Aspectos Relevantes da Nanotecnologia e a Sua Aplicação na Construção Civil**. *Revista Especialize On-line IPOG*, 6ª Edição nº 006, Vol. 01/2013, ISSN 2179-5568. Instituto de Pós-Graduação - IPOG, Aracaju, SE. Obtido em 12 de abril de 2013.

CETENO, G. **China pode estar desenvolvendo uma versão stealth de sua cópia do Black Hawk**. 2022. Disponível em: <https://www.aeroflap.com.br/china-pode-estar-desenvolvendo-uma-versao-stealth-de-sua-copia-do-black-hawk/#:~:text=A%20China%20poderia%20estar%20desenvolvendo,o%20projetista%2Dchefe%20da%20aeronave>. Acesso em: 4 abr. 2022.

CORREL, J. T. **History of Stealth: From Out of the Shadows**. *Airforce Magazine*, Virginia, 2019. Disponível em: <https://www.airforcemag.com/article/history-of-stealth-from-out-of-the-shadows/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

CORVETAS (Classe Barroso). **Marinha do Brasil**, s.d. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/corvetas-classe-barroso>. Acesso em: 4 abr. 2022.

DIAMOND, J. **Armas Germe e Aço: Os Destinos das Sociedades Humanas**. 19ª ed. rev. Rio de Janeiro: Record, 2017. 689 p. ISBN 978-85-01-11281-1.

FRIEDE, R. **Invisibilidade e Furtividade: a Gênese da Tecnologia Stealth**. Defesanet, 2018. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/tecdi/noticia/30875/Reis-Friede---Invisibilidade-e-Furtividade--a-Genese-da-Tecnologia-Stealth/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

GUERRA Eletrônica #22 - Seção Reta Radar. Direção: Luis Felipe de Moura Nohra. Fotografia: Gabriel Brandão Nohra. *NA HORA DA GUERRA*, 2022. 1 vídeo (5m20s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5wAvVSdxLGg&list=PLnsgZysUDpBa3Do-ERhn0YVve8oxjlaNo&index=2>. Acesso em: 21 mar. 2023.

R. Figueiro & S. Rana (Eds.), **Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards**

Industrial Applications - From Science to Market. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/418195867/Fangueiro-Rana-2016-Natural-Fibres-Advances-in-Science>> . Acessado em 15 de junho.

LOCKHEED MARTIN. **Sea Shadow.** Disponível em: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/history/sea-shadow.html>. Acesso em: 01 out. 2020.

CNET. **Early Images of the U-2 Spy Aircraft Being Tested at Area 51.** Disponível em: <https://www.cnet.com/pictures/early-images-of-the-u-2-spy-aircraft-being-tested-at-area-51/>. Acesso em: 21 mar. 2023.

Galante, A. (2018, 7 de maio). **Radar quântico – fim do stealth? Aéreo - Notícias de Defesa e Indústria.** Acesso em: <<https://www.aereo.jor.br/2018/05/07/radar-quantico-fim-do-stealth/>> Acesso em: 21 mar. 2023.

FLICKR. **Imagem do U-2 Spy Aircraft.** Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/56594044@N06/22965290304/>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SANTOS, J. M. et al. **Aplicações práticas de tecnologia stealth em navios militares.** São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.21.13.55/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2023.

OLIVEIRA, L. C. T. et al. **Tecnologia furtiva em aeronaves e embarcações militares.** São José dos Campos: INPE, 2018. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/01.19.13.19/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2023.

RESEARCHGATE. **Antena arrays on integrated mast.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/363816874/figure/fig1/AS:11431281175940304@1689957045230/Antenna-arrays-on-integrated-mast.png>. Acesso em: 21 mar. 2023.

USNI. **This is What a Chinese Stealth Warship Looks Like on Radar.** Disponível em: <https://news.usni.org/2021/09/27/this-is-what-a-chinese-stealth-warship-looks-like-on-radar>. Acesso em: 21 mar. 2023.

Yakudami. SKETCHFAB. **USS Zumwalt (DDG-1000), 2019.** Disponível em: <<https://sketchfab.com/3d-models/uss-zumwalt-ddg-1000-f521d9c702284768adeeddef199389a0>>.

Acesso em: 21 mar. 2023.

DIAMOND, J. **Armas, Germes e Aço**. São Paulo: Companhia das Letras, 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/622169/mod_resource/content/1/Diamond%2C%20Jared%2C%20Armas%2C%20Germes%20e%20A%C3%A7o.pdf. Acesso em: 21 mar. 2023.

NAITO, Y.; SUETAKE, K. **Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics**. *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 19(1), 1971

[vv] NAITO, Y., SUETAKE, K., “**Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics**”, *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 19 (1), 1971
 Physique, 38, pp. (C1) 1 – 1[jj] GLOBUS A., “Some physical considerations about the domain wall size theory of magnetization mechanisms”, *Journal de LIMA*, Roberto da Costa; FALCO, Ana Paula Santiago. Instituto Nacional De Pesquisa Da Marinha Pioneiro Nacional Na Técnica De Invisibilidade. *O Periscópio*, Rio de Janeiro, ano 2018, v 69, n. 69, 31 out. 2018. *Ciência e Tecnologia*, p 40-43.

LIMA, Roberto da Costa. **Propriedades Absorvedoras De Microondas De Compósitos Epoxídicos De Y-Hexaferritas De Bário Obtidas Pelo Método De Combustão Do Gel De Citrato**. Orientador: Tsuneharu Ogasawara e Magali Silveira Pinho. 2007. 181 f. Tese (Doutor Em Ciências Em Engenharia Metalúrgica E De Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MCGILLVRAY, John W. **Stealth Technology in Surface Warships**. U.S. Naval War College, v. 47, n. 4, 1994.

MIRANDA, Erasmus Couto Brazil. **O Problema das Antenas Embarcadas**. 22 out. 2021. 39 slides. Material apresentado para a disciplina de Antenas, Propagação e Interações Atmosféricas (API) no curso de Guerra Eletrônica da Marinha do Brasil.

NERI, Fillippo. **Introduction to electronic Defense Systems**. 3ª. Ed. **United States of America: Artech House**, 2018. 760 p ISBN B07HGHBTWX.

NOHRA, Luis Felipe de Moura. Aula 7 – **Equações do Radar**. [S.l.]: **GUERRAELETRÔNICA.COM**, c2022. Disponível em: <https://guerraeletronica.com/aula-7-as-equacoes-do-radar/>. Acesso em: 14 fev. 2022.

O RADAR quântico realmente existe?. [S.l.]: Hoje no Mundo Militar, 2019. 1 vídeo (5m41s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=A3unFfgUe2A>. Acesso em: 31. Mar. 2022.

PADILHA, Luiz. Submarino A26 – **Tecnologia stealth em alto nível**. [S.l.]: **Defesa Aérea & Naval**, 7 out. 2021b. Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/submarino-a26-tecnologia-stealth-em-alto-nivel>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PESCE, Giovanni. **O Desenvolvimento De Tecnologias De Caráter Dual Pela Indústria De Defesa Brasileira**: Desafios E Oportunidades Para A Marinha Brasileira: A importância estratégica de uma política de uso dual na Indústria de Defesa Brasileira, seus desafios e suas oportunidades para a Marinha do Brasil (MB). Orientador: Prof. Dr. Thauan dos Santos. 2019. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Política e Estratégia Marítimas) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2019.

QUANTUM radar will expose stealth aircraft: New \$2.7 million project funded by Department of National Defence will develop technology for quantum radar. Canada: INSTITUTE FOR QUANTUM COMPUTING, 12 abr. 2018. Disponível em: <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/news/quantum-radar-will-expose-stealth-aircraft>. Acesso em: 13 abr. 2023.

Naval Technology. (2009, February 4). **Waterjets Propel Sweden's Visby to Success**. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/features/feature49549/> Acesso em: 13 abr. 2023.

RF-IR Stealth (Techniques/Benefits). [S.l.]: Aircraft 101, 4 mar. 2016. Disponível em: <https://basicsaboutaerodynamicsandavionics.wordpress.com/2016/03/04/stealth-techniques-and-benefits/>. Acesso em: 18 mar. 2022.

RIES, Uilian. **A Tecnologia Stealth Debaixo da Água**. [S.l.]: Hoje no Mundo Militar, 13 dez. 2019. Disponível em: <https://hojenomundomilitar.com.br/a-tecnologia-stealth-debaixo-da-agua/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

Richards, G. (2009, February 4). **Waterjets Propel Sweden's Visby to Success**. **Naval Technology**. <https://www.naval-technology.com/features/feature49549/?cf-view&cf-closed> /. Acesso em: 30 mar. 2022.

RIO exhibe um surpreendente conjunto de centros de pesquisa ligados à Marinha, ao Exército e à Aeronáutica: Rio - Capital militar do país. [S. l.]: Defessanet, 11 jul. 2011. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/tecnologia/noticia/1823/Rio-exibe-um-surpreendente-conjunto-de-centros-de-pesquisa-ligados-a-Marinha--ao-Exercito-e-a-Aeronautica/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

SCHWERZ, Jorge Luiz. **Proposição De Método De Medição De Seção Reta Radar De Aeronaves**. Orientador: Mirabel Cerqueira Rezende. 2004. 205 p. Pós-graduação em Engenharia Eletrônica e Computação na Área de Microondas e Optoeletrônica (Mestre em Ciência) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

SIKORSKY UH-60 “Black Hawk”. [S.l.]: Hoje no Mundo Militar, 2018. 1 vídeo (7m49s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SfFpbVwD2k0>. Acesso em: 30. Mar. 2022.

SCHULZ, Peter A. B.. **Nanociência de baixo custo, Física na Escola**, v. 8, n. 1, 2008. Disponível em : <<https://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num1/v08n01a02.pdf>> . Acessado em: 12. maio. 2023.

SILVA, Valdirene Aparecida da; PEREIRA, José Jesus; NOHARA, Evandro Luís; REZENDE, Mirabel Cerqueira. **Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La**. Journal of Aerospace Technology and Management, [S. l.], ano 2009, v. 1, n. 2, p. 255-263, 6 nov. 2009. DOI 10.5028/jatm.2009.0102255263.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jatm/a/YLtT3HcmstRqFjkvcyFXQCr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 9 abr. 2022.

SWEETMAN, BILL. **Stealth Aircraft-History, Technology and Outlook**. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Virgínia, ano 1990, p. 1-8, c1990.

TREVITHICK, Joseph. **Photo Emerges Showing Sweden`s Stealth Visby Class Corvette`s Tiny Radar signature**. [S.l zone/31333/photo-emerges-showing-swedens-stealthy-visby-class-corvettes-tiny-radar-signature. Acesso em: 17 mar. 2022.

VALDUGA, Fernando. ESPECIAL: **Invisibilidade e Furtividade: a Gênese da Tecnologia Stealth**. [S. l.]: Cavok Asas da informação, 7 out. 2018. Disponível em: <https://www.cavok.com.br/especial-invisibilidade-e-furtividade-a-genese-da-tecnologia-stealth>. Acesso em: 25 fev. 2022.

ZIKIDIS, Konstantinos; SKONDRAS, Alexios; TOKAS, Charisios. **Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies**. Journal of Computations & Modelling, Attica, ano 2014, v. 4, n. 1, p. 129-165, 2014. The Drive, 2019. Disponível em: <https://www.thedrive.com/the-war->

GLOSSÁRIO

JAMMER – Bloqueador que gera uma perturbação equivalente a um ruído térmico muito forte no receptor do radar (*jamming*). É, desta forma, utilizado para mascarar o sinal refletido por um radar inimigo.

BURNTHROUGH - Refere-se à distância na qual um radar consegue detectar um alvo mesmo na presença de um bloqueador.

TRAKING - Também conhecido como rastreamento, indica o processo de seguir a posição de um ou mais alvos no espaço. A precisão da medição do ângulo para um radar de rastreamento deve ser maior do que a de um radar de busca.

MEDIDA DE ATAQUE ELETRÔNICO (MAE) - Consiste em ações para impedir ou reduzir o uso efetivo do espectro eletromagnético pelo inimigo, dividindo-se em MAE destrutiva e não-destrutiva.

MAE DESTRUTIVAS - São ações destinadas a destruir fisicamente o inimigo, atingindo um grau de letalidade significativo.

MAE NÃO-DESTRUTIVAS - São técnicas que visam suprimir o uso do espectro eletromagnético pelo inimigo sem causar dano físico.

CLUTTER - Refere-se a um fenômeno de eco causado por objetos indesejados que interferem no desempenho do radar.

CHAFF - São pequenos dipolos ressonantes usados para confundir ou mascarar o radar inimigo, criando desordem no display do radar.

DECOY - São dispositivos que se assemelham à plataforma protegida, usados para saturar o sistema defensivo inimigo e despistar o radar.

MÍSSEIS DE CRUZEIRO - São artefatos guiados com cargas explosivas que percorrem longas distâncias em trajetórias não balísticas, impulsionados por motores a jato.

9 APÊNDICE

A.1 Radar Quântico

O conceito deste radar beira à ficção científica baseando-se no entrelaçamento quântico. Resumindo, por se tratar de um fenômeno físico bastante complexo, ao pegar uma partícula elementar (fóton) e a dividi-la em duas através de um cristal, serão obtidos dois fótons interligados, onde caso um deles sofra qualquer tipo de alteração, esta se refletirá imediatamente no outro (O RADAR, 2019).

Apesar da Teoria da Relatividade de Einstein afirmar que nada pode se mover mais rápido que a velocidade da luz, foi comprovado cientificamente que dois fótons obtidos através de um podem se comunicar de forma instantânea. Essa comunicação limita-se ao spin da partícula, que resumidamente seria a direção para qual a ela rotacional (O RADAR, 2019).

A aplicação prática para esse entrelaçamento seria o radar quântico, o qual utiliza a iluminação quântica para filtrar os ruídos. Este método divide o fóton em dois, dos quais um é retido e o outro é convertido para uma frequência de micro-ondas, preservando-se o seu estado quântico.

Esse sinal de micro-ondas, é emitido pela estação como se fosse um simples sinal de radar, que ao ser refletido por um objeto, altera o seu estado quântico. Quando o sinal retorna à estação, ele é reconvertido para o seu estado original de fóton, que ao ser comparado com o outro que foi mantido na estação é verificado se o primeiro foi alterado, caso positivo toma-se como indício de que algo foi encontrado (O RADAR, 2019).

A Figura A.1 representa o esquema do novo experimento de imagem. Os pulsos de fóton único polarizados de um laser HeNe são refletidos do objeto e capturados em uma câmera de multiplicação de elétrons (*EMCCD*) por meio de um filtro de interferência (*IF*). Uma placa de meia onda (*HWP*) e um separador de feixe de polarização (*PBS*) são usados para fazer a medição da base de polarização apropriada. Com isso, quatro imagens correspondentes às quatro polarizações medidas são obtidas. O ângulo de reflexão é inferior a 5 graus, sendo exagerado na figura para maior clareza. Na realidade, o objeto consiste em uma silhueta de avião furtivo refletivo (GALANTE, 2018).

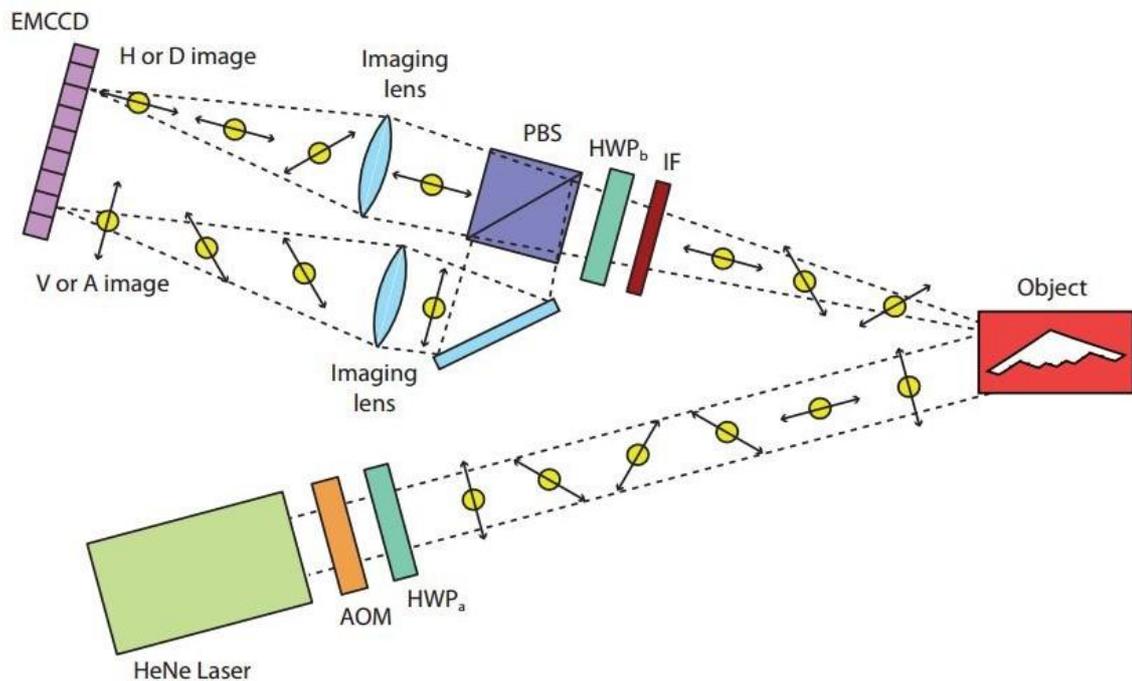


Figura A.1 – Esquema do experimento de um radar quântico

Fonte: Radar quântico - fim do Stealth? (GALANTE, 2018)

Segundo o site da Universidade de Waterloo (2018), seu Instituto de Computação Quântica (*IQC*) iniciou um projeto liderado pelo físico Jonathan Baugh, o qual utiliza desse fenômeno de emaranhamento quântico para eliminar o ruído de fundo (*clutter*) dos radares. Esse projeto está sendo custodiado pelo Departamento de Defesa Nacional do Canadá, sendo desembolsado para isto o valor de US\$ 2,7 milhões.

“No Ártico, o clima espacial, como tempestades geomagnéticas e explosões solares, interfere na operação do radar e torna a identificação efetiva de objetos mais desafiadora. Ao passar do radar tradicional para o radar quântico, esperamos não apenas superar esse ruído, mas também identificar objetos que foram projetados especificamente para evitar a detecção.” Disse Jonathan Baugh (QUANTUM, 2018).

Há diversos desafios técnicos para se construir algo dessa magnitude. Hoje o projeto canadense se encontra confinado sendo desenvolvido em laboratório. Porém, a China afirmou ter testado essa nova tecnologia com sucesso e que já foi iniciada a produção em massa de radares quânticos. Como não há nenhum detalhamento técnico, deixam-se dúvidas se realmente esse radar existe.

10 ANEXO A – Tabela de SRR

Table 1		
Radar Cross Section		
(Square Meters)	(dBsm)	
	0.0001	-40
Insects →	0.0003	-35
	0.001	-30
	0.003	-25
Large Bird →	0.01	-20
Adult Duck →	0.03	-15
Cruise Missile →	0.1	-10
	0.3	-5
B-1B Bomber →	1	0
Conventional Jet Fighter (Nose-on) →	3	5
	10	10
	30	15
Boeing 707 or Conventional Bomber (Nose-on) →	100	20
200-ton Boat →	300	25
	1,000	30
	3,000	35
3,500-ton Frigate →	10,000	40
	30,000	45
9,000-ton Cruiser →	100,000	50
	300,000	55
	1,000,000	60
	3,000,000	65
94,000-ton Aircraft Carrier →	10,000,000	70

Fonte: *Stealth Technology in Surface Warships*. (MCGILLVRAY, 1994)

11 ANEXO B – Tabela de Bandas

DESIGNAÇÃO DA BANDA	FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)	USO GERAL
HF	3 – 30	
VHF	30 – 300	Sistemas de vigilância de altíssimo alcance
UHF	300 – 1.000	
L	1.000 – 2.000	Sistemas de vigilância de longo alcance, controle de rotas de tráfego aéreo
S	2.000 – 4.000	Sistemas de vigilância de médio alcance, controle próximo de tráfego aéreo, radares meteorológicos de longo alcance
C	4.000 – 8.000	Sensoriamento a longas distâncias, radares meteorológicos aeroembarcados
X	8.000 – 12.000	Sensoriamento a curtas distâncias, sistemas guias de mísseis, mapeamento, radar marinho, sistemas de interceptação de aeronaves
K _u	12.000 – 18.000	Mapeamento de alta resolução, altimetria de satélites
K	18.000 – 27.000	Pouco utilizado devido à interferência com o vapor de água
K _a	27.000 – 40.000	Mapeamento de altíssima resolução, sistemas de vigilância de aeroportos
Milimétrica	40.000 – 300.000	Experimental

Fonte: PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE MEDIÇÃO DE SEÇÃO RETA RADAR DE AERONAVES. (SCHWERZ, 2004)