

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

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM**  
**SISTEMAS DE ARMAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**TECNOLOGIA DE RADARES *PHASED ARRAY*: desenvolvimento, inovações e aplicações**  
**para meios navais**



**PRIMEIRO-TENENTE CAIO SOUTO CYPRIANO**

Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE CAIO SOUTO CYPRIANO

TECNOLOGIA DE RADARES *PHASED ARRAY*: desenvolvimento, inovações e aplicações  
para meios navais

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

Orientadores:

CT CAIO CARNEIRO SILVA ROCHA

Prof Dr MARCO ANTONIO GRIVET MATTOSO  
MAIA

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE CAIO SOUTO CYPRIANO

TECNOLOGIA DE RADARES *PHASED ARRAY*: desenvolvimento, inovações e aplicações  
para meios navais

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

Aprovada em \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

Caio Carneiro Silva Rocha, Esp. – CGAEM

\_\_\_\_\_

Marco Antonio Grivet Mattoso Maia, D.Sc. – PUC

\_\_\_\_\_

Alessandro Roberto dos Santos, D.Sc. – CIAA

\_\_\_\_\_

Thales Raia Curioni, M.Sc. – CGAEM

\_\_\_\_\_

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

Dedico este trabalho aos que buscam, através do conhecimento, o desenvolvimento de um país mais próspero, desenvolvido e soberano.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me sustentar em todas as dificuldades.

A minha esposa, Juliana, pelo apoio incondicional em todas as dificuldades. É o meu porto seguro.

Aos meus pais, por terem me permitido trilhar o caminho que me levou a ter capacidade de realizar este trabalho.

Ao CT Caio Rocha, pelo tempo e paciência que dispensou em orientar e revisar o desenvolvimento e as diversas etapas desta monografia.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

TECNOLOGIA DE RADARES *PHASED ARRAY*: desenvolvimento, inovações e aplicações  
para meios navais

**Resumo**

Os radares *phased array* são uma inovação tecnológica que une as melhorias de capacidades presentes em radares convencionais com a possibilidade de utilização de um sistema multifuncional, já que um único pode realizar diversas tarefas. Nesse contexto, pode ser observada a sua utilização em meios navais militares há, pelo menos, duas décadas, já em níveis de capacidade relativamente avançados, mas em evolução contínua. Com isso, é válida a pesquisa a respeito de suas características funcionais, arquitetura utilizada, bem como as capacidades inerentes à sua utilização e quais as melhorias trazidas ao elemento operacional, com objetivo de verificar sua aplicabilidade para Marinha do Brasil e a importância do domínio tecnológico sobre sistemas deste tipo. Este trabalho foi desenvolvido com a metodologia de revisão de bibliografia, contando com verificações de sistemas específicos considerados de interesse e com uma breve análise de conjuntura internacional de defesa. É possível a conclusão de que a tecnologia *phased array* permanece sendo a mais avançada entre os radares utilizados em navios militares, e também, o acerto em prever a sua utilização nas futuras Fragatas Classe “Tamandaré”.

**Palavras-chave:** radar, *phased array*, radar multifuncional, matriz de fase

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Funcionamento de um radar genérico.....	19
Figura 2- Diagrama de blocos simplificado.....	20
Figura 3- Varredura híbrida por meio de arranjo de sensores.....	28
Figura 4: Conceito geral de um sistema <i>phased array</i> .....	30
Figura 5- Arquitetura de um PESA.....	32
Figura 6- Diagrama para um módulo de transmissão/ recepção.....	33
Figura 7- Capacidades do radar multifuncional AESA 4D Sea Fire.....	37
Figura 8- Comparação de arquiteturas passiva e ativa de radares <i>phased array</i> .....	38
Figura 9- USS Jack H. Lucas equipado com o SPY-6(V)1.....	49
Figura 10- Antena do sistema Artisan 3D.....	51
Figura 11- Antenas do radar Sea Fire em fase de testes pré integração.....	52
Figura 12- Ilustração do Projeto FCT com o radar TRS-4D no seu mastro principal.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Radares e funções desempenhadas.....	21
Tabela 2- Comparação entre os radares <i>phased array</i> passivo e ativo.....	38
Tabela 3- Relação (em %) entre as importações e exportações de armas.....	45

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1- Quantidade de publicações sobre radar por país.....	41
Gráfico 2- Quantidade de publicações sobre radar por ano.....	41

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADT	<i>Automatic Detection and Tracking</i>
AESA	<i>active electronically scanned array</i>
APPAD	Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa
BID	Base Industrial de Defesa
CME	contramedida eletrônica
END	Estratégia Nacional de Defesa
ESAR	<i>Electronically Scanned Array Radar</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAR	Força Aérea Real (do inglês RAF – Royal Air Force)
FCT	Fragatas Classe “Tamandaré”
GaAs	arseneto de gálio
GaN	nitreto de gálio
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IFF	<i>identification friend or foe</i>
II GM	Segunda Guerra Mundial
LNAs	<i>Low Noise Amplifiers</i>
MB	Marinha do Brasil
MAE	medidas de ataque eletrônico
MIMIC	<i>Microwave and Milimeter Wave Monolithic Integrated Circuits</i>
MTI	<i>Moving Target Indication</i>
NAM	Navio Aeródromo Multipropósito
ONU	Organização das Nações Unidas
PEM	Plano Estratégico da Marinha
PESA	<i>passive electronically scanned array</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
STT	<i>Single Target Tracker</i>
T/R	transmissor/ receptor
TWS	<i>Track-While-Scan</i>
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Apresentação do Problema</b> .....	13
<b>1.2 Justificativa e Relevância</b> .....	13
<b>1.3 Objetivos</b> .....	14
1.3.1 Objetivo Geral .....	14
1.3.2 Objetivos Específicos .....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>2.1 Histórico do desenvolvimento</b> .....	16
<b>2.2 Princípios de funcionamento e construção</b> .....	18
<b>2.3 Principais tipos de sistema radar por função</b> .....	21
<b>2.4 Autores e Literaturas</b> .....	22
<b>3 RADAR MULTIFUNCIONAL <i>PHASED ARRAY</i></b> .....	26
<b>3.1 Desenvolvimento e características do radar <i>phased array</i></b> .....	27
3.1.1 Radar <i>phased array</i> passivo .....	31
3.1.2 Radar <i>phased array</i> ativo .....	33
3.1.3 Comparação radar <i>phased array</i> passivo e ativo .....	37
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	40
<b>4.1 Classificação da Pesquisa</b> .....	42
4.1.1 Classificação Quanto aos Fins .....	42
4.1.2 Classificação Quanto aos Meios .....	42
<b>4.2 Limitações do Método</b> .....	42
<b>4.3 Universo e Amostragem</b> .....	43
<b>4.4 Coleta e Tratamento dos Dados</b> .....	43
<b>5 DESCRIÇÃO</b> .....	44
<b>5.1 Considerações sobre o cenário de defesa</b> .....	44
<b>5.2 Sistemas de radar utilizados pelas marinhas</b> .....	48
5.2.1 SPY-6 – Estados Unidos da América .....	48

5.2.2 Tipo 997 Artisan 3D – Reino Unido .....	50
5.2.3 Sea Fire – França .....	51
5.2.3 TRS-4D – Alemanha .....	52
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>6.1 Considerações Finais .....</b>	<b>57</b>
<b>6.2 Sugestões para futuros trabalhos .....</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nesta parte do trabalho serão apresentados os pontos principais a serem abordados bem como os objetivos que se pretendem alcançar.

## 1.1 Apresentação do Problema

O desenvolvimento de novas táticas de combate naval sempre esteve atrelado à evolução tecnológica de sua época. Nas guerras dos tempos remotos, navios eram utilizados como plataformas para combate corpo a corpo entre os beligerantes. Com o desenvolvimento da arquitetura dos meios, passou a ser possível a utilização da própria estrutura do navio como parte da solução de batalha, através do chamado esporão ou aríete, partes componentes do bico de proa dos navios. Contextualizando para os tempos atuais e vindouros, pode-se perceber que evolução e aperfeiçoamentos tecnológicos ocorrem com mais velocidade e fluidez, trazendo aos seus pioneiros vantagens táticas e algumas vezes estratégicas que geralmente são traduzidas em poder militar e político.

Os diversos tipos de sistemas radar representam para os navios a capacidade de detecção de objetos, em se tratando de navios militares, para vigilância e detecção, rastreamento de alvos, defesa aérea, direção de tiro entre outras. No entanto, os diferentes tipos de radar possuem capacidades de acordo com seu nível de desenvolvimento e para o que foram construídos. Dentro desse espectro, é possível observar que paulatinamente os radares *phased array* foram escolhidos para equipar os navios militares das principais potências tecnológicas e militares, começando pelos Estados Unidos da América (EUA) e passando, posteriormente, a equipar navios de outros países com alto investimento em defesa. Portanto, é possível supor que essa tecnologia possui características relevantes que justifiquem a sua escolha em detrimento de outras.

Com isso, o problema a ser estudado é sobre como, atualmente, radares *phased array* podem ser diferenciais para garantir superioridade militar naval, passando pelo contexto do seu desenvolvimento, capacidades e avanços alcançados com a sua utilização.

## 1.2 Justificativa e Relevância

A constante polarização mundial, tensões entre países, bem como os recentes conflitos armados entre Rússia e Ucrânia têm mostrado a relevância dos países manterem forças militares capazes de prover a dissuasão necessária à altura das riquezas que possui. No ano de 2022, o investimento militar global bateu um novo recorde, atingindo a marca de 2,2

trilhões de dólares (Chade, 2023). Isso é capaz de apontar que os investimentos em defesa estão tanto ou mais em evidência do que no passado e o quanto o desenvolvimento tecnológico na área militar pode ser significativo atualmente.

A necessidade de se obter conclusões prementes a respeito da importância operacional e tática da utilização de radares *phased array* traduz, associado às características geopolíticas atuais, a justificativa de se estudar esse tema. Sua relevância se dá pela possível obtenção de uma efetiva comparação entre essa tecnologia e a de outros radares, visando verificar se são aplicáveis para a Marinha do Brasil (MB), apresentando as vantagens verificadas.

### 1.3 Objetivos

Nesta parte do trabalho serão apresentados os objetivos, separados em: objetivo geral, que foca no que se espera obter principalmente neste trabalho e em objetivos específicos, que são tópicos que deverão ser abordados nas etapas de construção.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Estabelecer aspectos que demonstrem a importância de se possuir a tecnologia *phased array* nos navios da MB, bem como a importância do incremento da capacidade de produzir esse tipo de sistema nacionalmente.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Durante as etapas do trabalho projeta-se passar por algumas temas que podem ser elencados como objetivos específicos, como:

- Apresentar o contexto histórico do desenvolvimento da tecnologia radar;
- Mostrar como se dão os princípios de funcionamento de um radar;
- Apresentar o modelo básico da estrutura de um radar;
- Apresentar alguns dos diferentes tipos de radar existentes, em relação aos seus princípios de funcionamento, mostrando as suas principais características de diferenciação;
- Apresentar os princípios de funcionamento, os tipos e os diferenciais dos radares *phased array*, com ênfase na sua característica multifuncional;
- Apresentar o contexto do desenvolvimento dos radares *phased array*, elencando suas características a cada etapa desse processo;

-Realizar uma breve verificação do cenário do mercado internacional de defesa, correlacionando com o setor nacional de defesa do Brasil; e

-Verificar os radares utilizados por marinhas de países que possuem alto investimento em defesa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será realizada uma abordagem histórica e técnica a respeito do desenvolvimento dos radares; serão apresentados os princípios de funcionamento, bem como alguns tipos de radares e suas principais funções e diferenças.

### 2.1 Histórico do desenvolvimento

O objetivo para o qual se buscou o desenvolvimento do radar foi para uso tipicamente militar. Entretanto, atualmente, tratam-se de equipamentos com as mais diversas aplicações civis, sendo utilizado como ferramenta para viabilizar desde previsões meteorológicas até a aferição de velocidade de veículos em estradas. A seguir apresenta-se um breve histórico da evolução dos radares e de suas principais técnicas.

O radar foi originalmente desenvolvido para atender às necessidades militares de vigilância e direção de tiro. As aplicações militares financiaram grande parte do desenvolvimento de sua tecnologia. No entanto, o radar encontrou significativas aplicações civis para a viagem segura de aeronaves, navios e espaçonaves; o sensoriamento remoto do ambiente, especialmente do clima; além de aplicativos de segurança pública e muitas outras aplicações (Skolnik, 1990, p. 1.2, tradução nossa).

Thumm [2001], afirma que em 30 de abril de 1904, Christian Hülsmeyer solicitou uma patente alemã para um meio de relatar corpos metálicos distantes a um observador por meio de ondas elétricas, uma forma rudimentar de radar. O inventor conseguiu demonstrar um alcance de três mil metros, mas não foi capaz de fazer despertar o interesse de líderes navais de sua época.

Ainda segundo Thumm [2001], em 1921, Albert Wallace Hull, trabalhando na Companhia General Electric, notou a possibilidade de controlar uma corrente de elétrons através da influência de um campo magnético, observando com isso a possibilidade de geração de radiofrequência. O seu dispositivo inovador foi chamado de *magnetron*.

Thumm [2001], diz que um sistema semelhante ao de Hülsmeyer foi patenteado em 1935 pelo físico escocês Robert Watson-Watt. O termo “radar” viria a surgir em 1940 como um acrônimo para *Radio Detection and Ranging*.

Ridenour (1947) apresenta de forma bastante detalhada o início da utilização dos radares pela Grã-Bretanha: o primeiro sistema experimental de radar produzido como sugeriu Watson-Watt foi montado no final do ano de 1935 em uma ilha na costa leste inglesa. Esse trabalho resultou na definição das principais características da rede britânica de estações de alerta antecipado. Já em 1936, foi iniciado o trabalho para que fossem instaladas cinco estações, afastadas cerca de 25 milhas umas das outras, visando a proteção dos territórios

próximos ao rio Tâmisa. No início de 1938, as estações já se encontravam construídas e operacionais sob o comando de pessoal da Força Aérea Real (FAR).

O esforço de desenvolvimento de radares britânicos foi então direcionado para equipamentos de radar aéreo. Dois tipos foram planejados: um conjunto para a detecção de embarcações superficiais por aeronaves de patrulha (chamado ASV, para aeronave a embarcação de superfície) e um equipamento para permitir que caças noturnos interceptassem aeronaves inimigas (chamado AI, para interceptação de aeronaves). O trabalho foi concentrado primeiro no ASV, e um equipamento experimental foi demonstrado com sucesso durante manobras da frota em setembro de 1938. O equipamento experimental AI estava funcionando até junho de 1939, e foi demonstrado ao chefe do Comando de Caças da FAR em agosto daquele ano. O Ministério do Ar solicitou que 30 desses sistemas fossem instalados em aeronaves nos próximos 30 dias. Antes do final de setembro, todos esses sistemas haviam sido instalados, sendo que quatro estavam prontos no dia em que a guerra começou (Ridenour, 1947, p. 15, tradução nossa).

Após a disseminação dos princípios de funcionamento desses sistemas, houve grande diversificação de pesquisa e desenvolvimento, levando a novos incrementos tecnológicos que elevaram as capacidades e possibilidades de uso. Ridenour (1947) explica que os conhecimentos obtidos pelo Reino Unido foram transmitidos aos americanos, que rapidamente conseguiram desenvolver equipamentos para fornecer suporte aos seus contingentes militares em operações de guerra.

Ridenour (1947) complementa mostrando que o crescimento no investimento em radares durante a Segunda Guerra Mundial (II GM) foi extremamente significativo. Entre 1940 e junho de 1945, estima-se que US\$ 2,7 bilhões foram investidos em equipamentos de radar pelos EUA para Marinha e Exército. No final da guerra, cerca de US\$ 100 milhões por mês eram produzidos em equipamentos radar.

Chan e Koo (2008) afirmam que em 1952, o sistema de afinamento do feixe Doppler foi desenvolvido por Wiley da Goodyear Corporation. Com isso, tornou-se possível observar o componente velocidade de alvos por meio do processamento da diferença de fases obtida entre os ecos gerados. Para que essa técnica funcione, o alvo deve estar se afastando ou se aproximando do radar, para que efetivamente ocorra a variação de fase do sinal.

Ainda segundo Chan e Koo (2008), no final da década de 1950 e início da década de 1960, foram desenvolvidos os *Synthetic Aperture Radar* (SAR)<sup>1</sup> na Universidade do Michigan e por algumas empresas. Ao mesmo tempo, pesquisas visando desenvolvimentos semelhantes estavam ocorrendo em países como a extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), França e Reino Unido. Os autores dizem ainda que os sistemas SAR, geralmente aerotransportados ou satelitais, são amplamente utilizados para uma grande gama

---

<sup>1</sup> O Radar de abertura sintética é usado para criar imagens bidimensionais ou tridimensionais de objetos e paisagens. Utiliza o movimento da antena do radar sobre a região alvo para fornecer uma resolução espacial mais precisa do que os radares estacionários convencionais de varredura de feixe.

de aplicações, como: monitoramento de mar e gelo, monitoramento de poluição por petróleo, oceanografia, classificação de terreno, entre outras.

Fenn *et al.* (2000), diz que o início do desenvolvimento de radares *phased array*, que serão abordados e explicados no capítulo 3, se deu no Lincoln Laboratory por volta de 1958. Apesar disso, afirma que esse conceito não se tratava exatamente de algo desconhecido já que os transmissores rádio primitivos e os primeiros radares utilizados na II GM usavam múltiplos elementos radiantes para alcançar padrões de radiação desejados nas antenas.

Muitas pesquisas para desenvolvimento de novas tecnologias no espectro dos radares estão voltadas para o denominado radar cognitivo. B. Filho, G. Neto e Sousa Junior (2018), assim como Maio e Farina (2015), explicam que esse novo conceito se baseia em requisitos básicos: processamento inteligente de sinais, com um reconhecimento do ambiente através das interações; e existência de um *feedback* contínuo e coordenado entre o receptor para o transmissor. Ou seja, através de algoritmos do sensor, ocorreria uma adaptação dinâmica do sistema ao ambiente em que se encontra, seja no âmbito operacional ou dos fatores ambientais.

O desenvolvimento dos radares vem ocorrendo desde a sua invenção, sendo amplamente utilizados no meio militar. Os sistemas no estado da arte, ou seja, que empregam o que há de mais moderno em desenvolvimento tecnológico, são preponderantemente utilizados em Forças Armadas de países que possuem o desenvolvimento nacional da tecnologia. A conformidade dessa observação pode ser percebida por meio da verificação dos meios militares de países latino-americanos – predominantemente países exportadores de matérias-primas, e com indústrias de base – que possuem, na maioria das vezes, tecnologias desenvolvidas há duas ou mais décadas atrás.

## 2.2 Princípios de funcionamento e construção

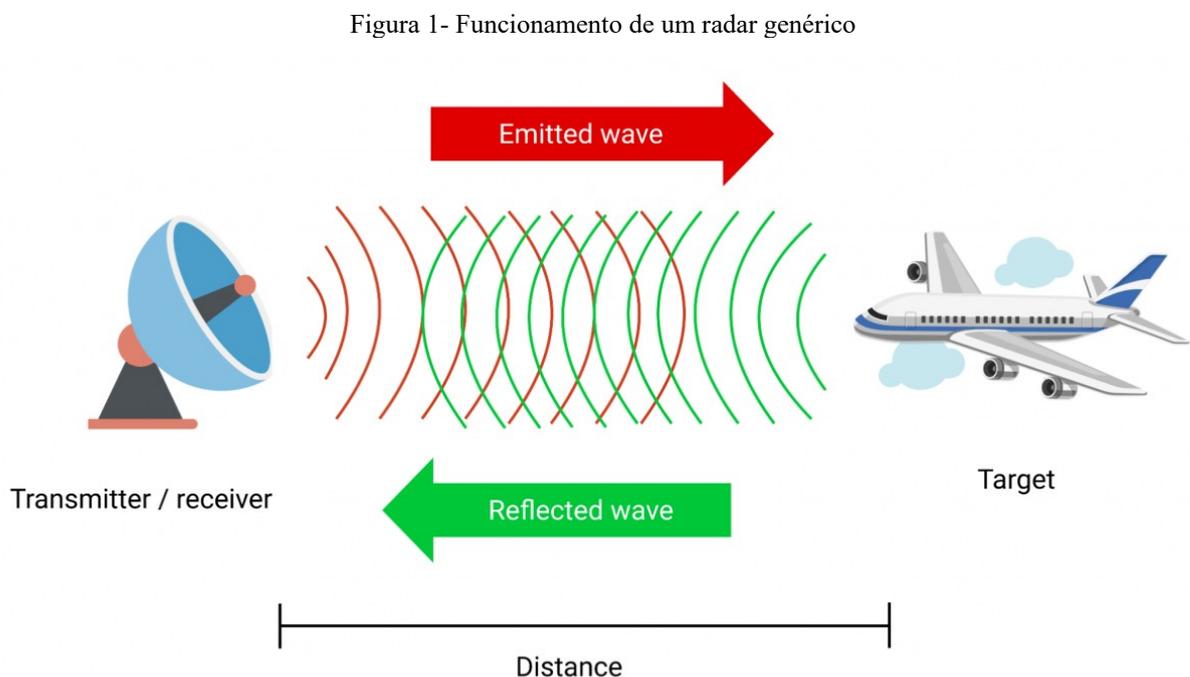
A compreensão a respeito do funcionamento de um sistema radar é relativamente simples, baseado da irradiação e recepção de ondas eletromagnéticas.

Em seu livro, *Radar Handbook*, Skolnik (1990) apresenta com clareza os princípios de funcionamento de um sistema radar e mostra que um radar opera irradiando energia eletromagnética e detectando o eco que retorna de objetos refletidos (alvos), com isso a natureza do sinal de eco fornece informações sobre o alvo. A distância até o alvo, ou *range*, é encontrada a partir do tempo que leva para a energia irradiada viajar até o alvo e retornar, já a localização angular do alvo é estimada ao se utilizar uma antena direcional, com uma

largura de feixe estreita para estimar o ângulo de chegada do sinal de eco. Se o alvo estiver se movendo, um radar pode estimar a sua trajetória e prever a localização futura.

Skolnik (1990) continua explicando que a mudança na frequência do sinal de eco recebido, devido ao efeito Doppler, causado por um alvo em movimento, permite que um radar separe alvos móveis desejados, de alvos estacionários indesejados ou *clutter* (como obstáculos terrestres e marítimos), mesmo que o sinal de eco estacionário possa ser muitas ordens de grandeza maior do que o alvo móvel. Com resolução suficientemente alta, um radar pode perceber algo sobre a natureza do tamanho e forma de um alvo. A resolução do radar pode ser obtida em distância ou ângulo, ou ambos. A resolução em distância requer largura de pulso ampla e a resolução em ângulo requer grandes antenas. A resolução na dimensão de alcance lateral geralmente não é tão boa quanto a resolução que pode ser obtida na distância. Quando há movimento relativo entre as partes, alvo e radar, é possível usar a técnica Doppler para obter a velocidade.

A partir desses conceitos, fica evidente que diferenças nos parâmetros de arquitetura do sistema radar levará a significativas influências em seu funcionamento e aplicação. A figura 1 ilustra, simplificada, o funcionamento de um radar:



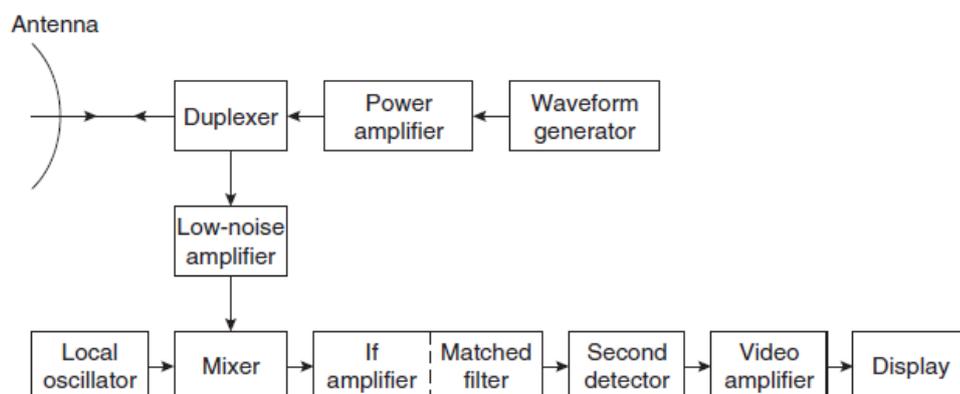
Fonte: Think Autonomous, 2023.

Skolnik (1990) complementa explicando que o radar opera como um dispositivo ativo devido à presença de seu próprio transmissor, não sendo condicionado à radiação ambiente, ao contrário da maioria dos sensores ópticos e infravermelhos. Ele é capaz de identificar alvos de dimensões relativamente pequenas, dependendo da proximidade ou distância, e pode determinar com exatidão a distância em variadas condições climáticas. Essa característica se destaca como sua principal vantagem em comparação com outros tipos de sensores.

Além do conhecimento a respeito do funcionamento de um radar no ambiente, é relevante a compreensão da sua arquitetura construtiva básica, que dá origem aos diferentes tipos e objetivos de funcionamento.

Sistemas de radar são constituídos de um transmissor e um receptor, além da antena. Skolnik (1990) explica que, a partir do bloco do transmissor, é gerado o conjunto de pulsos que é irradiado pela antena para o ambiente externo. Em um sistema radar biestático, é comum a utilização de um duplexer, que permite que uma mesma antena seja utilizada tanto para a transmissão quanto para a recepção dos pulsos. Os ecos refletidos pelos alvos do ambiente externo retornam a antena e são direcionados ao bloco receptor, onde serão amplificados e processados de maneira a apresentar os alvos ou a silhueta do espaço externo. Para isso, é necessário que o processamento elimine o ruído utilizando-se de técnicas de filtragem. A representação gerada ao término desse processamento é geralmente apresentada em uma tela a um operador, que pode utilizar a informação para diferentes objetivos.

Figura 2- Diagrama de blocos simplificado



Fonte: Skolnik, 2008.

Com os adventos da eletrônica, os radares passaram a ser capazes de realizar funções que antes precisavam da inferência de um operador, como por exemplo, selecionar

um alvo ou realizar alarmes específicos para diversas situações que podem ser configuradas. Além disso, arquiteturas e componentes mais modernos e sofisticados são capazes de gerar resultados ou ter competências diversificadas.

### 2.3 Principais tipos de sistema radar por função

Skolnik (2008) afirma que não existe uma única forma de caracterizar um radar. Baseado nisso, apresentou uma relação distinguindo tipos de radar, priorizando sua característica principal. Por meio dessa classificação, este autor elaborou a tabela 1 apresentando as definições de alguns sistemas de radar considerados mais relevantes no contexto do emprego militar e suas principais funções.

Tabela 1- Radares e funções desempenhadas

Tipo de Radar	Função
Radar de Vigilância	Um radar de vigilância é aquele que detecta a presença de um alvo (como uma aeronave ou um navio) e determina sua localização em alcance e ângulo. Ele também pode observar o alvo ao longo do tempo para obter sua trajetória. Deve ter capacidade de cobrir um grande volume, isto é, conseguir detectar e acompanhar um alvo a longas distâncias, de maneira a gerar um alarme antecipado.
<i>Moving Target Indication</i> (MTI)	Este é um radar de pulso que detecta alvos em movimento em meio a interferências, usando uma baixa frequência de repetição de pulso que geralmente não apresenta ambiguidades de alcance. No entanto, ele apresenta ambiguidades no domínio de Doppler, que resultam em chamadas "velocidades cegas".
<i>Single Target Tracker</i> (STT)	Rastreia um único alvo a uma taxa de dados alta o suficiente para fornecer um rastreamento preciso de um alvo em manobra. Um tempo de revisita de 0,1 segundo (taxa de dados de 10 medições por segundo pode ser "típico"). Pode empregar o método de rastreamento monopulso para informações precisas de rastreamento na coordenada de ângulo.
<i>Automatic Detection and Tracking</i> (ADT)	Este é o rastreamento realizado por um radar de vigilância. Pode ter um grande número de alvos em rastreamento usando as medições das localizações dos alvos obtidas ao longo de várias varreduras da antena. Sua taxa de dados não é tão alta quanto a do STT. Os tempos de revisita podem variar de um a 12 segundos, dependendo da aplicação.
<i>Track-While-Scan</i> (TWS)	É um radar que fornece vigilância sobre uma região estreita de ângulo em uma ou duas dimensões, para fornecer, a uma rápida taxa de atualização, informações de localização sobre todos os alvos dentro de uma região angular limitada de observação. Foi usado no passado em radares terrestres que guiam aeronaves para o pouso, em alguns tipos de radares de controle de armas e em alguns radares aéreos militares.

<b>Tipo de Radar</b>	<b>Função</b>
Rastreador <i>Phased Array</i>	Um escaneamento eletrônico por matriz de fases <sup>2</sup> pode rastrear (quase) continuamente mais de um alvo a uma alta taxa de dados. Também pode fornecer simultaneamente o rastreamento de baixa taxa de dados de múltiplos alvos, semelhante ao realizado pelo ADT.
Radar de Direção de Tiro	Este nome é geralmente aplicado a um rastreador de alvo único usado para se defender contra ataques aéreos.
Radar de Orientação	Este é geralmente um radar em um míssil que permite ao míssil "seguir" ou guiar-se até um alvo.
Radar Multifuncional	Se cada um dos radares acima fosse considerado como fornecendo alguma função de radar, então um radar multifuncional é projetado para executar mais de uma dessas funções, geralmente executando uma função de cada vez em uma base compartilhada de tempo.

Fonte: Skolnik, 2008.

Essa classificação não é limitante, podendo-se relacionar diversas outras formas de separação. Entretanto, para este trabalho, foi considerada suficiente.

O radar multifuncional, como apresentado, consegue realizar diversas tarefas que antes eram realizadas por um sistema de radar específico. Os radares multifuncionais, para que possam desempenhar as funções requeridas, frequentemente são desenvolvidos atrelados a tecnologia *phased array*. Essa necessidade advém da busca pela obtenção de maior desempenho e de maiores capacidades.

## 2.4 Autores e Literaturas

Nesta pesquisa são utilizadas diversas referências bibliográficas. A seguir são apresentados os principais autores consultados e os conteúdos que contribuíram para elaboração desta monografia.

Agrawal *et al.* (2001) apresenta um panorama do desenvolvimento de antenas de matriz de fase, com o foco voltado para as necessidades de um navio que são, em geral, geradas pelos tipos de ameaças, e sua evolução. O estudo aponta para como os radares *phased*

<sup>2</sup> É uma antena de arranjo faseado cujos irradiadores podem ser alimentados com diferentes turnos de fase. Como resultado, o feixe irradiado pode ser direcionado eletronicamente, sendo mais flexível e não requerendo o direcionamento mecânico.

*array*, tornaram-se fundamentais para que seja possível fazer frente a esses novos tipos de adversários.

Al-Rashid (2009) realiza uma explicação focada em radares *phased array* ativos, para isso cita características e processo evolutivo dos sistemas, além de apresentar perspectivas do que considera que está por vir. Suas pontuações a respeito dos componentes, além de comparações realizadas entre matriz de fase ativa e passiva são de grande importância.

Chan e Koo (2008) apresentam abordagens de filtragem e processamento de dados além de mostrar os princípios básicos do SAR, verificaram-se conteúdos relevantes quanto ao seu desenvolvimento e capacidades de utilização.

Chang (1991) apresenta vantagens da utilização de radares *phased array* ativos, realizando comparação com radar de varredura mecânica, radares *phased array* passivos e apresentando dados de performance. São ainda abordados dados técnicos de arquitetura como os processadores de sinal digital e a circuitos integrados.

Fenn *et al.* (2000), tem uma abordagem voltada para os quarenta anos anteriores no que diz respeito ao desenvolvimento de radares *phased array*, com ênfase nas pesquisas desenvolvidas no Lincoln Laboratory. Esta abordagem permite a compreensão de aspectos relevantes dos passos tecnológicos e perspectivas durante o desenvolvimento da tecnologia em lide.

Correa Filho *et al.* (2013) realiza um estudo sobre o panorama da indústria de defesa no Brasil e das mudanças trazidas por políticas públicas voltadas para esse setor.

B. Filho, G. Neto e Sousa Junior (2018) realizam uma pesquisa a respeito das tendências relacionadas a área de radares, mostrando o crescimento da quantidade de estudos sobre o tema, bem como uma diversificação das áreas de aplicação, buscando com isso apresentar algumas projeções para utilizações futuras.

Maio e Farina (2015) desenvolvem um estudo a respeito dos radares cognitivos, apresentando sua conceituação, os princípios biológicos utilizados para sua possível implementação e os desafios relacionados ao processamento de sinais relacionados a processos cognitivos artificiais.

Mailloux (2005) desenvolve uma obra conceitual e técnica a respeito de antenas *phased array* abordando principalmente a engenharia dos sistemas com as equações que regem seu funcionamento dentro dos diversos tipos possíveis.

Moo e Ding (2015) fazem uma pesquisa a respeito de radares *phased array* que possuam como recurso um canal de comunicação sendo possível o compartilhamento de

dados de rastreamento e de detecção entre radares de diferentes meios, verificando se isso possibilitaria uma melhora no desempenho geral.

Orman *et al.* (1996), encontra-se uma verificação de eficiência operacional de radares multifuncionais *phased array*, com o objetivo principal de realizar melhores programações visando um desempenho superior e eficaz. São então apresentados conceitos específicos e modelo de simulação funcional de ambiente radar multifuncional.

Özkan (2008) busca realizar uma análise que coloca como fatores dependentes a indústria de defesa e as relações internacionais, passando pela apresentação de uma série de dados que embasam a sua pesquisa, comparando indústrias de entes internacionais e mostrando a configuração global gerada por esses fatores.

Phillips (1981) aborda as capacidades trazidas pelo desenvolvimento de um novo tipo de radar multifuncional e como isso poderia ser um diferencial para eliminação de problemas anteriores, bem como, para o desenvolvimento de um radar de controle de armas e que seja integrado a um sistema de armas embarcado.

Pompeo *et al.* (2012) realiza um estudo sobre diagramas de radiação de antenas *phased array* linear, com foco em realizar comparações dos resultados obtidos com os diferentes métodos de otimização utilizados.

Ridenour (1947), em sua obra visava proporcionar uma introdução ao estudo dos radares que, à época, ainda encontravam-se em sua fase inicial de exploração. Dentre os conhecimentos apresentados obtêm-se uma apresentação histórica de fatos relevantes para o desenvolvimento dos sistemas então existentes.

Santos (2022) realiza uma abordagem do processo de escolha do radar TRS-4D para equipar as Fragatas Classe “Tamandaré”, mostrando alguns aspectos técnicos e diferenciais que esse novo sistema implementará na MB, seja em relação ao guarnecimento ou das capacidades que serão alcançadas a partir da utilização do novo sistema.

Skolnik (1990), com sua ampla obra, aborda tecnicamente a teoria relacionada a diversos tipos de radar existentes, trazendo atualizações em relação a sua primeira edição. Foram observados tantos conceitos gerais quanto específicos como fonte de consulta e referência.

Thumm [2001], que elaborou um trabalho a respeito das mais importantes contribuições históricas dadas por pesquisadores e empresas alemãs – além de relacioná-las com pesquisadores russos – para física e aplicações de ondas eletromagnéticas, foi possível verificar por meio de recortes históricos as participações dos indivíduos que foram

diferenciais na concepção dos equipamentos radar, dos mais rústicos aos primeiros elementos operacionais.

Van Genderen (2000) elabora um estudo que visa apresentar o estado da arte da tecnologia *phased array*, passando por etapas do processo de desenvolvimento, citando sistemas específicos e ao final apresentando tecnologias inovadoras que visam elevar ainda mais o seu nível. Esse estudo abordou a evolução histórica de maneira resumida, bem como a apresentação do estado da arte em algumas vertentes.

Wei (2022) realiza um estudo a respeito do desenvolvimento dos radares com foco em descrever como o uso de novos materiais pode levar ao avanço da tecnologia *phased array*. São observadas então, abordagens que vão do histórico de desenvolvimento até as perspectivas futuras.

### 3 RADAR MULTIFUNCIONAL *PHASED ARRAY*

O desenvolvimento das técnicas e novas tecnologias, além do desenvolvimento da eletrônica, resultou na possibilidade de utilização de um sistema que desempenhe diversas funções.

Mailloux (2005) apresenta as antenas *phased array* como um conjunto de elementos estacionários que, ao serem alimentados coerentemente e utilizando o controle de fase e o atraso variável em cada elemento, são capazes de direcionar um feixe em ângulos específicos no espaço. Isso faz com que seja possível um maior controle do padrão de irradiação, resultando na ocorrência menor de lóbulos laterais. Destaca-se, entretanto, que, acima de outras vantagens, está a capacidade de se produzir um feixe direcional de alto ganho e realizar o seu reposicionamento eletronicamente.

Moo e Ding (2015) dizem que um radar *phased array* tem como característica a capacidade de posicionar rapidamente e ajustar os tempos de permanência de seus feixes de forma adaptativa, com isso, um único radar torna-se capaz de desempenhar múltiplas funções, como vigilância, rastreamento de alvos e direção de tiro.

“Um radar multifuncional é um novo sistema de radar complexo que combina as tarefas anteriormente isoladas de busca em volumes de espaço, rastreamento de alvos e orientação de mísseis.” (Orman *et al.*, 1996, p. 14)

Segundo Orman *et al.* (1996), na utilização de radares convencionais, é comum a ocorrência de problemas relacionados à necessidade de receber energia refletida pelo alvo de forma suficiente a ultrapassar um limiar de detecção previamente definido no dispositivo, isso se deve ao fato de apenas uma pequena parcela da energia transmitida pelo radar retornar ao sistema para ser processada. Esse fato é devido à inerente dispersão de energia ao ser interceptada pelo alvo, bem como, a perda de sinal devido a distância percorrida.

Em relação a isso, Orman *et al.* (1996) mostra a comparação com os radares multifuncionais: as vantagens da utilização de uma antena de feixe estreito passa a ser a concentração da energia transmitida. Sendo possível direcionar a energia, sua parte interceptada pelo alvo passa a ser passível de monitoramento. Dessa forma, esse tipo de radar possui propriedades únicas, sendo passíveis de exploração em diversos cenários.

Outra vantagem está no tempo de resposta quando comparados com antenas que possuem varredura mecânica.

A excitação da abertura pode agora ser modulada controlando a fase dos elementos individuais para gerar feixes que são digitalmente varridos. A grande vantagem do arranjo de sensores com controle eletrônico em comparação com os refletores é o tempo necessário para direcionar os feixes e a flexibilidade no direcionamento.

Enquanto radares anteriores levavam segundos para direcionar para uma nova localização, as matrizes de fase levam microssegundos (Skolnik, 2008, p. 7.1, tradução nossa).

Orman *et al.* (1996) explica que a possibilidade do radar focar alvos específicos se deve a capacidade de variação das fases relativas. Com isso, o radar é capaz de focar seu feixe em qualquer direção para receber os sinais de eco específicos, através do ajuste de irradiação dos elementos de sua antena de maneira eletrônica. A capacidade de realizar esse ajuste de maneira eletrônica traz a esse tipo de radar uma vantagem de tempo considerável quando comparada a radares de varredura mecânica, nos quais o movimento físico da antena pode tornar-se uma desvantagem em cenários onde o tempo de reação mínimo é diferencial para obtenção de êxito.

O Navio Aeródromo Multipropósito (NAM) “Atlântico” da MB, está equipado com um radar *phased array* multifuncional BAE Systems Artisan 3D, sendo o mais moderno em operação na Força.

Nos tópicos a seguir, será explorado o desenvolvimento dos radares *phased array*, partindo dos seus estudos iniciais e indo até a produção dos radares multifuncionais apresentados.

### 3.1 Desenvolvimento e características do radar *phased array*

Serão abordados neste tópico como ocorreu o desenvolvimento e características construtivas principais desse tipo de sistema.

A tecnologia *phased array* tem sido continuamente explorada desde que foi introduzida em 1900. A tecnologia *phased array* era teórica até 1940, quando, na Segunda Guerra Mundial, o Laboratório Lincoln americano controlou pela primeira vez a direção das ondas de sinal através do controle mecânico do movimento dos elementos (Wei, 2022, p.1, tradução nossa).

Para Fenn *et al.* (2000), no início do desenvolvimento dos radares *phased array*, havia certo ceticismo quanto a possibilidade de desenvolvimento de um sistema que contasse com um arranjo de milhares de elementos de matriz e que fosse capaz de trabalhar em coerência de fase estritamente coordenada. Ele complementa dizendo que o ceticismo se justificou pelo tempo que foi necessário para se desenvolver o sistema até seu estado mais sofisticado e que a busca por formas de construção mais econômicas permaneciam como um desafio.

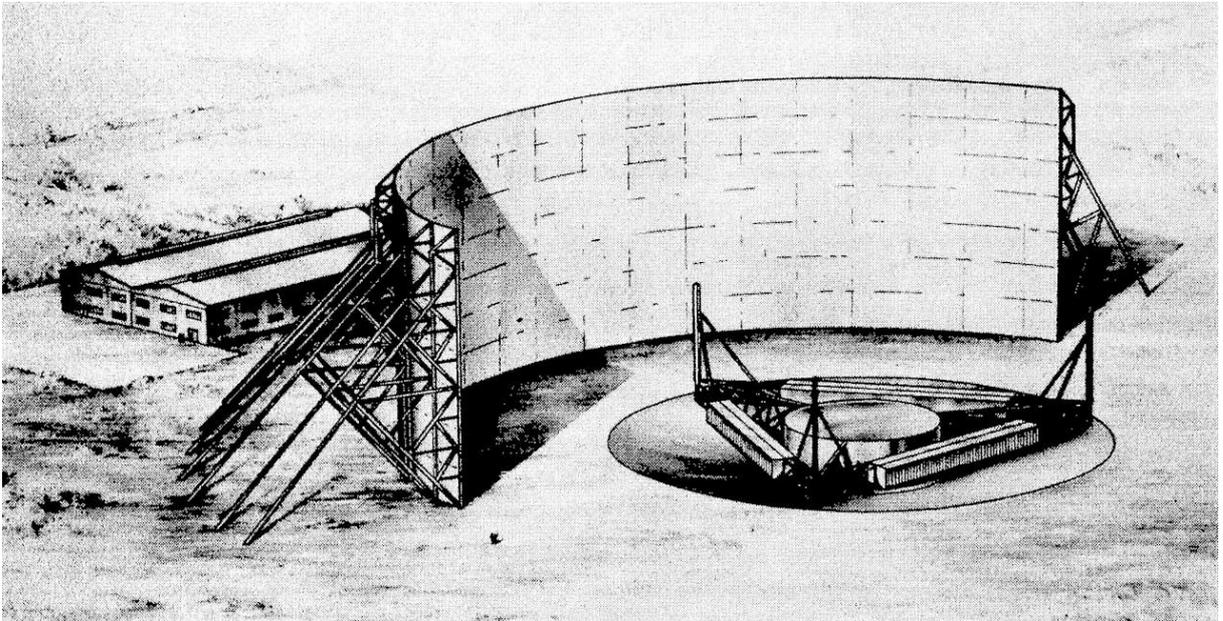
Fenn *et al.* (2000) diz ainda que a investigação a respeito da teoria de antenas *phased array* se deu por meio do Lincoln Laboratory em 1958, e que a idealização inicial do projeto deu grande foco na compreensão e modelagem do sistema de matriz de fases. Além

disso, que a dificuldade inicial principal era atender aos requisitos de volume de varredura e largura de banda, evitando pontos cegos e mantendo lóbulos laterais baixos.

Seu objetivo inicial era o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar vigilância de satélites, após, em 1957, a URSS ter realizado o lançamento do seu primeiro satélite artificial, o Sputnik I. Fenn *et al.* (2000), explica que a solução vislumbrada para possibilitar a detecção de todos os satélites que passassem sobre o território americano seria a construção de um grande arranjo planar de antenas com cerca de cinco mil elementos. Para isso buscou-se uma configuração de matriz híbrida, ou seja, que realizasse o escaneamento de forma mecânica e eletrônica.

A figura 3 mostra a representação artística do que foi apresentado como solução para a problemática descrita acima. Simplificando a explicação da ilustração apresentada em Fenn *et al.* (2000), o arranjo contaria com três conjuntos verticais de antenas lineares rotativas que formariam múltiplos feixes de recepção em ângulos de elevação, que eram escaneados mecanicamente ao longo do refletor cilíndrico. Os transmissores utilizariam três antenas dispostas horizontalmente que não necessitariam do refletor, nem seriam escaneados eletronicamente.

Figura 3- Varredura híbrida por meio de arranjo de sensores



Fonte: Fenn *et al.*, 2000.

Fenn *et al.* (2000) explica que, devido limitações do projeto com de arranjo linear antenas, principalmente relacionados à necessidade de se desenvolver um sistema capaz de

realizar a defesa ativa contra mísseis balísticos, o que exigiria o máximo de agilidade em feixe, flexibilidade, aumento de potência e ampla varredura angular, passaram a focar no desenvolvimento do arranjo planar de sensores. Pompeo *et al.* (2012) explica que a geometria da antena, bem como a disposição dos elementos influenciam nas suas capacidades. Como exemplo, um *array* linear só seria capaz de realizar a varredura de um plano, enquanto formas de *array* planar permitem que a varredura seja realizada em três dimensões.

Segundo Wei (2022), na década de 1960, no contexto da Guerra Fria, os EUA aprofundaram os estudos para o desenvolvimento da tecnologia *phased array*, sendo realizados por meio da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada e, enviados para o desenvolvimento de um radar de conjuntos de antenas de fase passiva. Foi obtido um radar de matriz de fases passivo controlado eletronicamente.

Wei (2022) diz que na conjuntura da época, era importante para os militares norte-americanos a obtenção de equipamentos com maior capacidade de potência. A partir disso a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (APPAD) estabeleceu ferramentas de alto nível como circuitos integrados de arseneto de gálio (GaAs), processos de fabricação de múltiplos chips, controle computacional preciso e ferramentas de modelagem de circuitos. Além disso, passou a utilizar métodos baseados em simulação para substituir os modelos tradicionais de produção de protótipos, reduzindo consideravelmente o tempo necessário para realizar o desenvolvimento.

Fenn *et al.* (2000) explica que o desenvolvimento de circuitos integrados de GaAs foi fator crucial para continuidade das pesquisas de radares de matriz de fase ativa, principalmente pela necessidade de produzir sistemas em menor escala de tamanho. O material a base de GaAs foi escolhido principalmente pelas suas características de adequação a faixas de frequência de micro-ondas. As frequências mais altas são necessárias para formação de feixes estreitos levando a uma alta resolução no rastreamento de alvos, enquanto as mais baixas, que cumprem mais facilmente requisitos de potência do transmissor, são necessárias as funções de vigilância e busca.

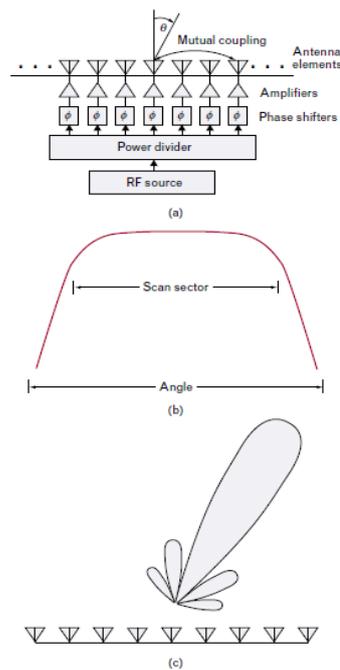
É mostrado por Fenn *et al.* (2000) que as pesquisas a respeito de circuitos integrados tornou-se um dos programas da APPAD. Com o nome de *Microwave and Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuits* (MIMIC), o projeto tinha o objetivo de investigar o uso prático do GaAs para circuitos integrados, e com isso desenvolver uma matriz de fase ativa com defasadores de circuito integrado e capacidade de transmissão/ recepção como parte integral de cada elemento da antena, de maneira sincronizada.

Fenn *et al.* (2000) e Agrawal *et al.* (2001), mostram que com o resultado positivo dessas pesquisas, foi possível o desenvolvimento de radares com matriz de fase ativa e, além disso, seu aproveitamento tecnológico em diversas outras aplicações civis e militares, como instrumentação automobilística, comunicações, *Global Positioning System* (GPS) e telefonia celular.

Complementando, Wei (2022) diz que a partir da década de 1990, radares com conjuntos de antenas de matriz de fase ativa tornaram-se a nova geração dos sistemas de radares militares de ponta, principalmente devido a sua grande eficiência quando comparado às tecnologias anteriores.

Fenn *et al.* (2000) apresenta o que era vislumbrado, conceitualmente, quando do início da pesquisa a respeito de antenas de matriz utilizando *shiftres*, na figura 4:

Figura 4: Conceito geral de um sistema *phased array*



Fonte: Fenn *et al.*, 2000.

Fenn *et al.* (2000) explica que o conceito geral de uma antena de matriz de fase combina eletronicamente os diagramas dos elementos para direcionar o feixe em uma direção específica. Na figura 4 (a), pode ser observado o conceito de antena de matriz de fases, utilizando defasadores de fase (*phase shifters*) para direcionar o feixe radar pelo setor de varredura. Em (b), pode ser visto o diagrama de irradiação idealizado, com a atenuação da

intensidade do sinal a partir dos limites do setor. Já em (c), pode ser observada a idealização do funcionamento do feixe, apontando na direção desejada, quando todos os deslocadores de fase da matriz atuarem corretamente alinhados.

Van Genderen (2000) apresenta um breve resumo do desenvolvimento da tecnologia de matriz de fase, ao dizer que os princípios da tecnologia já eram explorados desde a II GM, no entanto a maioria dos avanços na teoria e tecnologia, que levaram a sua compreensão e emprego mais plenos, foram realizados nas décadas de 1950 e 1960 e, apesar disso, seu uso operacional só foi iniciado na década de 1970. Os dois componentes mais importantes para a impulsão do desenvolvimento da tecnologia foram os deslocadores de fase e a tecnologia computacional para o controle das matrizes de fase. Ficou evidente a necessidade de grandes investimentos em tecnologia militar, feitos por países com grandes economias. Por fim, é citado o amadurecimento da tecnologia ocorrido na década de 1980, e que a partir do final da década de 1990 diversas empresas já são capazes de desenvolver e fabricar sistemas dotados da tecnologia *phased array*.

Como mostrado, a continuidade dos processos de desenvolvimento dos radares *phased array*, levou primeiramente a operacionalidade de radares com matriz de fase passiva e, posteriormente, com evolução desses sistemas, aos radares com matriz de fase ativa. Os processos de desenvolvimento específico e as características de ambos serão abordados nos tópicos a seguir.

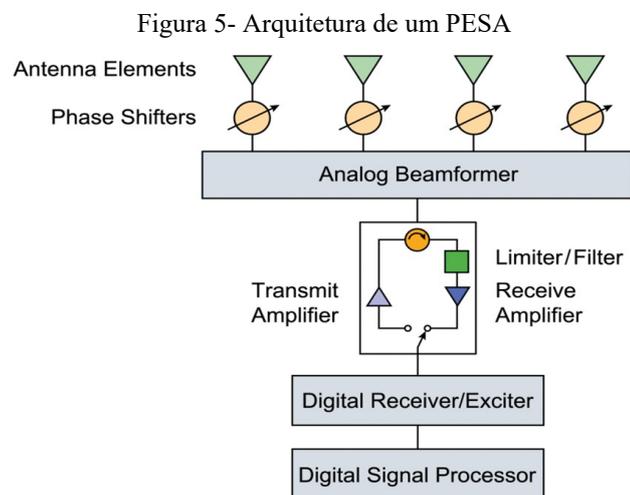
### 3.1.1 Radar *phased array* passivo

Phillips (1981) explica que com a utilização de uma matriz de fase, deixa de ser necessário o apontamento mecânico da antena para realizar o rastreamento de alvos. A energia do transmissor é enviada à antena e distribuída em uma grande quantidade de defasadores de fase individuais. Esses deslocadores de fase possuem a função de direcionar eletronicamente o feixe de radar, sendo controlado por um computador. Com isso, torna-se possível uma maior agilidade do feixe em toda a área de cobertura, possibilitando o rastreamento de centenas de alvos pelo mesmo radar.

Fenn *et al.* (2000) diz que o primeiro radar *phased array* desenvolvido foi chamado de *Electronically Scanned Array Radar* (ESAR). O radar possuía deslocadores de fase analógicos com frequência intermediária e um formador de feixe com frequência intermediária. A partir disso, iniciou-se a busca por técnicas que levassem a se obter os deslocadores de fase digitais, buscando melhor controlabilidade e tamanho menor.

Wei (2022) explica que já na década de 1970 os radares com antenas *passive electronically scanned array* (PESA) passaram a ser foco prioritário de militares devido ao seu relativo baixo custo e alta confiabilidade.

As arquiteturas de conjuntos de antenas passivas requerem o uso de *beamformers* e deslocadores de fase de baixa perda, uma vez que há muita perda no caminho de saída do sinal. Os radares de conjuntos de antenas de fase passivos possuem apenas um transmissor central e um receptor. A energia de radiofrequência gerada pelo transmissor é distribuída automaticamente por computador para os radiadores individuais do conjunto, e o sinal refletido pelo alvo é uniformemente amplificado pelo receptor. O radar de arranjo de sensores passivos tem apenas um transmissor e um receptor, portanto, se for danificado, não funcionará (Wei, 2022, p. 1, tradução nossa).



Fonte: Wei, 2022.

Wei (2022) mostra, a partir da figura 5, que a antena é estruturada com uma linha de distribuição de guias de ondas eletromagnéticas e de uma linha de retardo, composta de defasadores de fase.

Fenn *et al.* (2000) explica que os *phase shifters* foram, inicialmente, baseados deslocadores de fase de diodo, tendo ampla utilização no final da década de 1960 e durante a década de 1970. Também foram desenvolvidos os deslocadores de fase de ferrite, visando maior desempenho, principalmente com relação a perdas de potência em frequências mais altas.

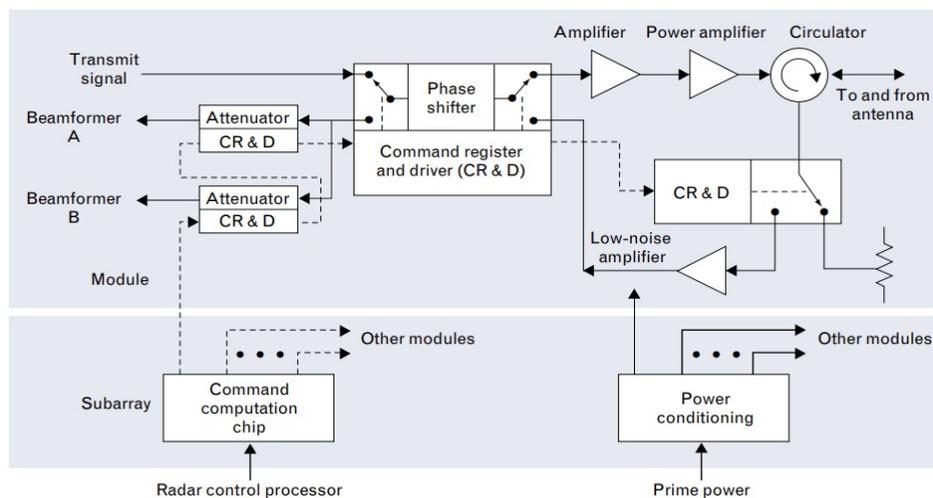
Ao apresentar as características de um PESA, Agrawal *et al.* (2001) diz que existem diversas limitações de desempenho e ineficiências inerentes. Como exemplos são elencados as perdas de potência no formador de feixe – assim como por Fenn *et al.* (2000) e Wei (2022), fazendo com que o transmissor tenha de gerar grandes potências para compensar. Destaca ainda que também há grande perda de energia pela dissipação de calor antes da

transmissão, possuindo, ainda, baixa flexibilidade na geração de formas de onda dos transmissores. Além disso, os transmissores de alta potência utilizam fontes de alimentação de tensão elevada e, por isso, possuem menor confiabilidade e custos de manutenção e substituição mais altos do que a tecnologia de estado sólido<sup>3</sup> (*phased array* ativo). Esta última questão é particularmente importante para aplicações a bordo de navios que envolvem missões relativamente longas e a necessidade de evitar manutenções no mar.

### 3.1.2 Radar *phased array* ativo

Fenn *et al.* (2000) e Agrawal *et al.* (2001) explicam que a evolução da tecnologia *phased array* se deu por meio do desenvolvimento de módulos de transmissão e recepção – denominados estado sólido – para radares dos tipos espacial e militar naval. O programa visava a utilização de circuitos integrados monolíticos de micro-ondas e circuitos digitais baseados em arseneto de gálio (GaAs) para produção de módulos de baixo peso, tamanho reduzido, resistentes à radiação, capazes de controlar as fases e gerando a potência adequadamente, ou seja, extremamente eficientes. Além disso, era necessário que fossem construídos a custo acessível, bem como consumir baixos níveis de energia.

Figura 6- Diagrama para um módulo de transmissão/ recepção



Fonte: Fenn *et al.*, 2000.

Na figura 6, Fenn *et al.* (2000), observa que o módulo contém interruptores, capazes de selecionar o caminho de transmissão ou recepção de sinal para a antena. O

3 Apesar do seu desenvolvimento ser voltado para tecnologia *phased array* ativa, existem radares PESA de geração mais avançada que utilizam o estado sólido em sua configuração construtiva e funcional. Um exemplo na própria MB seria o radar RAN-20S, que utiliza transmissores de estado sólido apesar de não ser um radar *phased array* ativo.

caminho da recepção possui atenuadores que realizam passagem de dados aos *beamformers*. Esses possuem a função de retroalimentar o sistema, geralmente por meio de compilação algorítmica, com as informações para o direcionamento e formação do feixe para transmissão e recepção ocorrerem de forma a obter continuamente o eco de um ou mais alvos. A transmissão possui deslocador de fase e amplificador de potência, visando alcançar o desempenho desejado do radar.

Para Wei (2022), o principal motivo para busca pelos radares com matriz de fase ativa foi a necessidade de superar as perdas de potência existentes nos de fase passiva. A mudança fez ainda com que fosse reduzida a figura de ruído da matriz, resultando em maior sensibilidade e alcance operacional mais longo. Outra vantagem elencada, assim como em Agrawal *et al.* (2001), é que, um *phased array* ativo permite a possibilidade de falha devido a deterioração do funcionamento de um determinado número de módulos até determinado limite do total de módulos da antena, mantendo ainda um desempenho aceitável.

Como motivos para o desenvolvimento dos radares *active electronically scanned array* (AESA), Agrawal *et al.* (2001) explica que esses sistemas podem proporcionar melhorias relacionadas ao desempenho, em relação aos radares PESA. De maneira geral, todos os radares de alto desempenho em desenvolvimento a partir dos anos 2000 empregam antenas de matriz ativas, que são as utilizadas pelos radares AESA. É afirmado que o principal fator para as pesquisas sobre os radares AESA foi a evolução dos tipos de ameaças. A matriz ativa fornece melhorias significativas no desempenho necessárias para fazer frente aos novos desafios. Além disso, apresenta melhorias em quesitos como confiabilidade, disponibilidade e custo de ciclo de vida.

Al-Rashid (2009) define os componentes básicos de um AESA como:

- a) Antena, que deve possuir elementos irradiadores dispostos junto a transmissor/receptor (T/R), e *beamformer* e, além disso, deve contar com um *beam steering computer* – que é um sistema computadorizado responsável pelo controle de direcionamento dos feixes;
- b) Gerador de onda;
- c) Receptor com conversor analógico/ digital;
- d) Processador de sinal; e
- e) Controle do radar, que executa as tarefas de sincronização e controle da operação do radar.

Para complementar o entendimento, Wei (2022) explica que há necessidade de calibração nos elementos da antena de matriz de fase, de forma que sejam capazes de apontar na posição correta e controlar o nível de emissão de ondas eletromagnéticas. A composição

das antenas de matriz de fase pode chegar a trabalhar com milhares de elementos, sendo necessária a atuação de computador para auxiliar na calibração.

Com os avanços tecnológicos proporcionados pelos radares com matriz de fase ativa, Al-Rashid (2009) diz que passou a ser possível a simultaneidade de múltiplas tarefas. Se o radar estiver com objetivo único, o tempo de varredura pode ser significativamente reduzido e, caso sejam objetivos múltiplos, o uso simultâneo de múltiplas frequências espaçadas suficientemente permite a multiplexação necessária para que o sistema suporte os diversos objetivos simultâneos.

Al-Rashid (2009) salienta que a escolha de um sistema ativo deve ser baseada no desempenho esperado e nas funções desejadas, além de se verificar a viabilidade financeira. Devido a isso, foi elaborado um mapa com três requisitos comparativos elencados: custo, desempenho e confiabilidade, que serão apresentados adiante.

Para Chang (1991), os radares *phased array* ativos oferecem uma gama de melhorias em relação aos passivos. É elencado que devido a amplificação dos sinais de transmissão e recepção ocorrerem junto a própria superfície radiante é mais eficiente, enquanto sistemas passivos teriam que utilizar um transmissor de três a quatro vezes mais potente, o que levaria a ser maior e com temperaturas de trabalho mais elevadas. Afirmam, assim como por Wei (2022) e Agrawal *et al.* (2001), que com os elementos T/R espalhados por toda a antena a possibilidade de falha crítica no sistema é reduzida, podendo o arranjo permanecer eficaz mesmo com o mal funcionamento de parte dos seus elementos.

[...] Nas matrizes ativas, tanto as funções de transmissão quanto as de recepção são movidas para a abertura, colocando um módulo T/R em cada elemento radiante [...]. Os módulos T/R fornecem amplificação de potência durante a transmissão e amplificação de baixo ruído durante a recepção, além de controle de amplitude e fase para direcionamento do feixe e redução de lóbulos laterais. [...] essa configuração coloca os amplificadores de potência e LNAs [*Low Noise Amplifiers* – amplificador de baixo ruído] na abertura, as perdas de transmissão e recepção são significativamente reduzidas, resultando em maior sensibilidade de radar para uma quantidade dada de potência de micro-ondas gerada (Agrawal *et al.*, 2001, p. 601, tradução nossa).

Outras vantagens relacionadas aos radares *phased array* ativos em comparação a radares de varredura mecânica são citadas por Chang (1991), como por exemplo, sua capacidade de rastrear aproximadamente cem vezes mais alvos. Além disso, são versáteis tendo diferentes formatos de feixe, sendo capazes de intercalar tarefas. O fato de não necessitarem utilizar partes móveis<sup>4</sup> em sua estrutura, pode ser classificado como uma vantagem de manutenção desses radares.

<sup>4</sup> Para empregos em navios de porte médio, são geralmente utilizadas antenas de uma face de *array* ativo sobre uma plataforma rotativa, utilizando assim a composição da varredura mecânica e eletrônica, mas com o conceito de controle de varredura eletrônica inalterado.

Para delimitar as principais funções desempenhadas por um radar multifunção *phased array*, Orman *et al.* (1996), as separa em três principais tarefas: vigilância, rastreamento e orientação de armas. Para isso, o volume total de busca do radar é dividido em regiões para que cada uma delas execute uma tarefa, a partir da utilização de diferentes feixes. Para a tarefa de busca, as regiões de interesse devem ser escaneadas repetidamente, enquanto para as tarefas de rastreamento e orientação de armas, o objeto de interesse deve ser monitorado repetidamente. Para execução dessas tarefas esses sistemas contam com uma estrutura de prioridade bem definida, para que possam ser resolvidos conflitos entre tarefas de que exijam do sistema o seu uso ao mesmo tempo.

Orman *et al.* (1996), apresenta a seguinte ordem de prioridade de execução de tarefas:

I – Tarefa de orientação de armas – baixa frequência, possuindo tempos de ciclo e de processamento variável;

II – Tarefa de rastreamento – maior frequência, quantidade variável, possuindo tempos de ciclo e de processamento variável; e

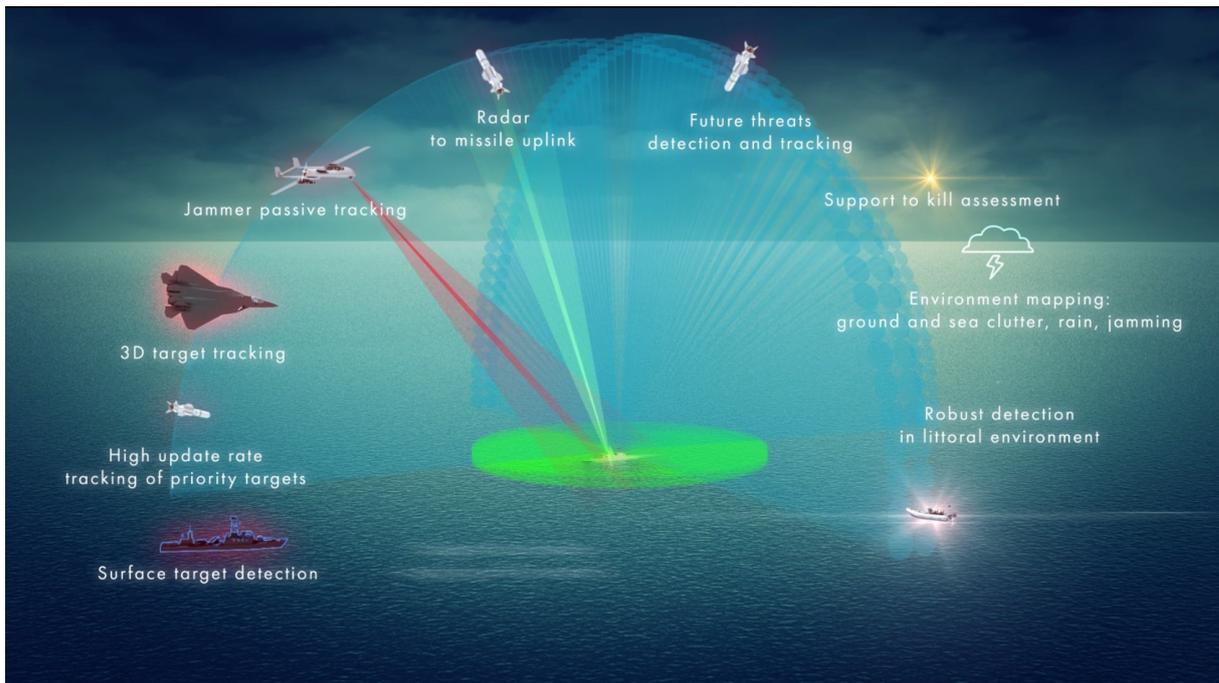
III – Tarefa de vigilância – grande número de execuções, possuindo tempo de ciclo e de processamento fixos.

Dentro dessas classificações podem, ainda, ocorrer prioridades, como é o caso para rastreamento que são: alta (para alvos se aproximando em alta velocidade), manutenção de rastreamento (para reencontrar um alvo perdido), média (para alvos de velocidade média), confirmação de plotagem e iniciação de rastreamento (para desenvolver uma plotagem de um alvo recém-detectado) e baixa (para alvos se afastando em de baixa velocidade).

A figura 7 apresenta a ilustração das diversas capacidades disponíveis em um radar AESA moderno. É possível observar nove diferentes possibilidades de uso do sistema, elencadas pela fabricante, sendo:

- Detecção de alvo de superfície;
- Acompanhamento em alta taxa de atualização para alvos prioritários;
- Rastreamento tridimensional de alvos;
- Rastreamento passivo de interferências (*jammer*);
- Conexão de transmissão de dados para míssil;
- Detecção e rastreamento de ameaças futuras;
- Avaliação assistida de danos;
- Mapeamento ambiental: interferência terrestre e marítima, chuva e *jamming*; e
- Detecção robusta em ambiente litorâneo.

Figura 7- Capacidades do radar multifuncional AESA 4D Sea Fire



Fonte: Thales Group, 2023.

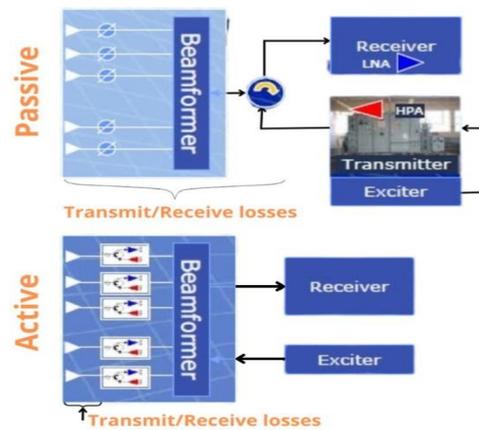
Quanto a melhorias de performance do sistema, Chang (1991), afirma que o uso da tecnologia AESA, permite superioridade substancial em relação a outros tipos de radar em quesitos como: maior alcance, melhor relação sinal/ ruído, varredura mais rápida, rastreamento preciso, maior resistência a interferências e seção reta radar – necessária para o nível de sinal mínimo – potencialmente menor. A partir de critério funcional dos sistemas, suas vantagens são evidentes.

### 3.1.3 Comparação radar *phased array* passivo e ativo

Os radares com matriz de fase ativa se diferem dos passivos, em relação à sua arquitetura, por contarem com um módulo T/R para cada elemento de sua antena.

A figura 8 ilustra, simplificada, as diferenças entre um radar de matriz passiva e um de matriz ativa. Pode-se perceber que em relação aos radares de matriz ativa são dispostos componentes transmissores/ receptores a cada elemento da antena, é ainda exposto que o caminho percorrido pela energia eletromagnética gerada no sistema tende a ser menor, ocasionando menos perdas.

Figura 8- Comparação de arquiteturas passiva e ativa de radares *phased array*



Fonte: Al-Rashid, 2009.

A tabela 2, a seguir, apresenta uma breve comparação entre os dois tipos de radares *phased array*, ou seja, compara antenas passivas e ativas. Antenas ativas geralmente têm um custo inicial mais alto, mas oferecem melhor desempenho e confiabilidade em comparação com as passivas.

Tabela 2- Comparação entre os radares *phased array* passivo e ativo

	Passivo	Ativo
Custo	Pode ser mais barato que radares convencionais, com antenas rotativas.	Custo mais elevado que o passivo, mas com potencial de redução ao longo do tempo.
Desempenho	Baixa taxa de transmissão, o que limita suas funções. Baixa estabilidade do sinal.	Alta taxa de transmissão, permitindo mais funções. Alta estabilidade do sinal, o que melhora a capacidade em ambientes com interferências.
Confiabilidade	Menos confiável. Seu transmissor/ receptor é um possível ponto de falha único. Níveis de sinal mais altos levam a necessidade de utilização de interruptores mecânicos.	Alta confiabilidade. Múltiplos amplificadores de alta potência permitem que haja uma degradação. Níveis de sinal mais baixo permitem a funcionalidade de interruptores de estado sólido.

Fonte: Al-Rashid, 2009.

Agrawal *et al.* (2001), elenca algumas vantagens que podem ser destacadas no uso de radares AESA em relação aos radares PESA, das quais destacam-se:

I – O aumento da sensibilidade do radar, relacionado à capacidade dos módulos T/R operarem em ciclos de trabalho mais altos que transmissores convencionais;

II – Melhor detecção de alvos em *clutter*, já que em uma matriz ativa, as principais fontes de ruído de transmissão e instabilidades (por exemplo, módulos T/R e fontes de alimentação) estão distribuídas na abertura. Com isso, suas contribuições de ruído não se somam coerentemente da mesma forma que o sinal transmitido. O resultado é uma melhoria significativa na capacidade de um radar de matriz ativa de detectar pequenos alvos em *clutter* marítimo ou terrestre;

III – Melhor flexibilidade de forma de onda, que possuem seu controle tanto de amplitude quanto de fase atrelados aos módulos T/R no seu nível de elemento. Isso propicia a otimização do modo de operação do radar. Está diretamente ligado à característica multifuncional em que operam esses sistemas, podendo ser designados para detecção, rastreamento, identificação, iluminação, entre outros, o que exige diferentes tipos de formação de onda eletromagnética; e

IV – Maior confiabilidade, principalmente devido à tecnologia de estado sólido e ao uso de fontes de alimentação de baixa tensão.

## 4 METODOLOGIA

Nesta seção será abordada a metodologia utilizada para elaboração deste trabalho. Observando-se o cabedal de informações utilizadas, é possível concluir que se trata de uma pesquisa qualitativa, ou seja, os dados apresentados baseados em referências bibliográfica são válidos para que sejam compreendidos e comparados o contexto que leva a tecnologia *phased array* a ser considerada um fator diferencial para os meios navais mais modernos.

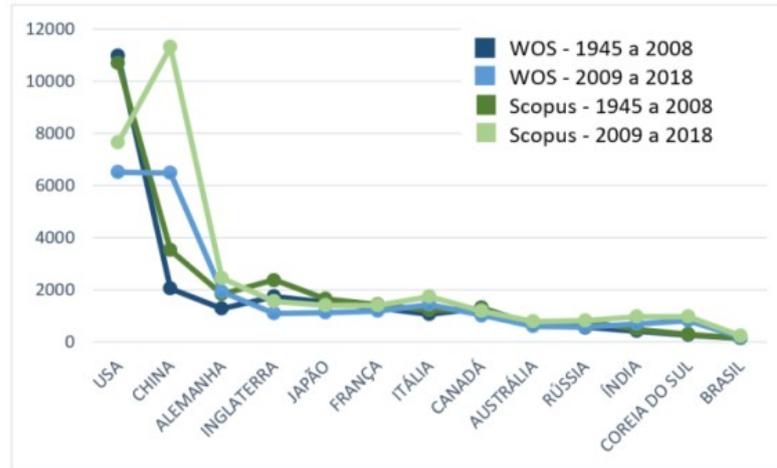
A pesquisa em sítios de internet a respeito de publicações referentes ao assunto deste trabalho é de pequeno retorno quando ocorre por trabalhos científicos nacionais, diferentemente do acervo obtido através da busca de publicações de outros países.

A literatura nacional existente no âmbito de radares, em sua maioria, esta voltada para pesquisas relacionadas a sistemas de radar que possuem usabilidade voltada para aplicações de uso civil. Isso pode demonstrar, inicialmente, um reduzido interesse brasileiro em investir e viabilizar pesquisas no âmbito de tecnologias de utilização militar. Obviamente, pesquisas em tecnologia são de alto custo, porém a obtenção do êxito pode trazer grandes retornos financeiros ao Estado que a patrocinou, com sua possível venda a outros países e sua aplicação em meios civis.

Por meio da pesquisa elaborada por B. Filho, G. Neto e Sousa Junior (2018) é possível verificar um balanço do que foi produzido a respeito do assunto, em geral, através de uma pesquisa bibliométrica onde foram apuradas, através das plataformas de concentração *Web of Science* e *Scopus*, os índices de produção de diversos países.

A compilação desses dados permitiu a verificação da quantidade de publicações produzidas por países, sendo possível sintetizar de alguma maneira os níveis de investimentos em pesquisa e desenvolvimento nessa área. O gráfico 1 apresenta um comparativo entre o número de publicações por país, em diferentes períodos e sítios pesquisados. É válido notar a presença do Brasil na lista dos países que mais produziram estudos sobre o tema. Não é possível verificar, no entanto, qual a temática majoritariamente tratada nas pesquisas por país.

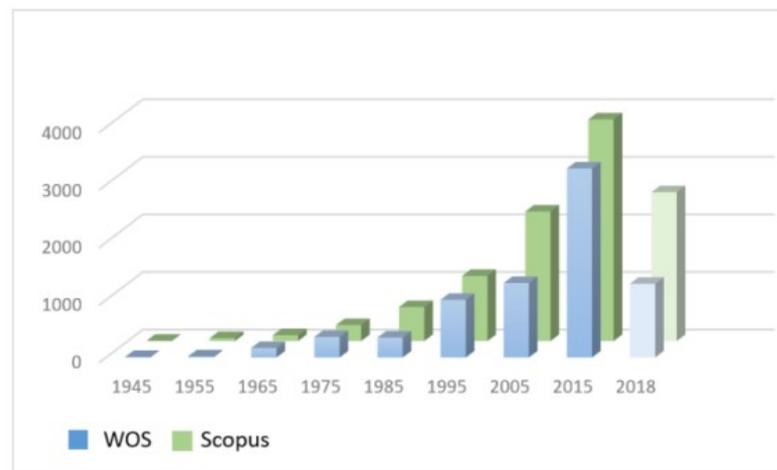
Gráfico 1- Quantidade de publicações sobre radar por país



Fonte: B. Filho; G. Neto; Sousa Junior, 2018.

Observando-se o gráfico 1, é possível constatar os países que mais publicaram estudos sobre radar, com larga diferença para EUA e China. O Brasil figura como último colocado, porém, levando-se em consideração que a relação apresenta apenas os treze países que mais realizaram publicações, pode-se inferir que, em uma classificação global, o país ocuparia uma posição relativamente alta.

Gráfico 2- Quantidade de publicações sobre radar por ano



Fonte: B. Filho; G. Neto; Sousa Junior, 2018.

A análise do gráfico 2 permite observar que a quantidade de publicações geradas desde 1945, a cada década, foi alvo de maior incremento no número de pesquisas, levando a uma curva exponencial de estudos publicados. Esse fato pode sugerir que haverá, nos

próximos anos, crescimento dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento na área de radar.

Essa tendência se justifica pelas múltiplas vertentes de aplicações e pela corrida tecnológica travada por potências antagônicas desde o fim da II GM, sendo mais evidente nas últimas duas décadas entre EUA e China. É possível verificar por meio do gráfico 1 que na última década os chineses superaram os americanos em quantidade de pesquisas publicadas, sendo necessária uma melhor avaliação quanto a qualidade do material produzido.

As referências utilizadas para este trabalho foram majoritariamente elaboradas por autores estrangeiros, já que, apesar de existir produção nacional a respeito de radares, a temática *phased array* possui maior elaboração internacional.

## **4.1 Classificação da Pesquisa**

Nesta seção a pesquisa será classificada quanto aos fins, quanto aos meios, serão abordadas as limitações do método utilizado, o universo de amostragem e como foi realizada a coleta e tratamento de dados.

### **4.1.1 Quanto aos fins**

A pesquisa possui o objetivo de identificar fatores que determinam ou contribuem para que possam ser exauridas conclusões a respeito da utilização de radares com matriz de fase. Por isso, sua classificação metodológica quanto aos fins é explicativa, tornando o assunto, que possui materiais majoritariamente em idioma estrangeiro, compreensível ao público em geral, buscando-se o encadeamento lógico de assuntos.

### **4.1.2 Quanto aos meios**

A elaboração deste trabalho se classifica quanto aos meios como bibliográfica, uma vez que para seu desenvolvimento foi necessária a pesquisa de diversas publicações e trabalhos acadêmicos de diversas instituições e autores, principalmente de origem estrangeira. Assim, a revisão de literatura foi o principal meio utilizado para elaboração deste trabalho, sendo necessária, ainda, a consulta a outros tipos de fontes de informações como sítios de internet.

## **4.2 Limitações do Método**

A limitação do método de pesquisa se configura a partir da necessidade de consulta a informações que não constam estritamente em trabalhos acadêmicos, ou seja, a utilização de outras fontes para obtenção de dados, principalmente para objetivos de comparação a serem apresentadas no capítulo 5.

### **4.3 Universo e Amostragem**

O universo da pesquisa são os radares do tipo *phased array*, sendo colocados como foco para busca por informações que sejam úteis a este trabalho.

A obtenção de dados funcionais e de parâmetros construtivos foi majoritariamente feita por meio de revisão bibliográfica, enquanto dados para apresentação de equipamentos específicos foram obtidos em sítios de internet relacionados a defesa, artigos que tratam de determinado equipamento ou sítios de internet de fabricantes que podem fornecer informações úteis a respeito desses sistemas.

### **4.4 Coleta e Tratamento de Dados**

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos através de pesquisas em sítios de internet voltados exclusivamente para busca de trabalhos acadêmicos.

O tratamento dos dados obtidos ocorreu por meio da análise de como poderiam melhor contribuir para elaboração deste trabalho. A utilização de trabalhos acadêmicos obtidos foi, em sua maioria, parcial, de forma que apenas partes que foram consideradas relevantes foram utilizadas. A organização do trabalho buscou encadear logicamente os fatores relacionados a radares indo de histórico de radares até a apresentação de características construtivas e funcionais de radares multifuncionais *phased array*.

Na análise a ser apresentada no capítulo 5, visa-se mostrar um panorama que, aliado à conceituação feita anteriormente, possa contribuir para a conclusão deste trabalho.

## **5 DESCRIÇÃO**

Para realizar uma melhor apresentação do posicionamento do Brasil em relação a temática de defesa no âmbito global, serão elencados aspectos comparativos gerais e, em seguida, serão apresentados os radares dos navios de escolta ou semelhantes de países selecionados.

### **5.1 Considerações sobre o cenário de defesa**

Fatores econômicos, políticos, tecnológicos e militares podem ser elencados como os principais para a regência da dinâmica das relações entre países. Esses fatores podem ser evidenciados quando, por exemplo, observa-se a composição dos membros permanentes do Conselho de Segurança da Organização das Nações Unidas (ONU) - composto por EUA, Rússia, França, Reino Unido e China, onde cada um dos países se destaca em ao menos três fatores dentre os quatro elencados.

Para Özkan (2008), a indústria de defesa global afeta com mais intensidade as dinâmicas do sistema internacional do que os outros fatores, e tende a ser o fator de equilíbrio de poder. Isso se deve principalmente pela interdependência entre poder político, poder militar, tecnologia militar e indústria de defesa.

Uma conceituação relevante citada por Özkan (2008), é que o poder militar é a combinação de vários elementos, incluindo Forças Armadas e ativos estratégicos, que podem ser multiplicadores de força, como: informações, capacidades de guerra eletrônica, guerra psicológica, sistemas em rede, capacidades de operações conjuntas, logística militar, capacidade de mobilização e qualidade do pessoal.

Entretanto, Özkan (2008), explica que possuir as capacidades acima elencadas podem não significar que um país seja efetivamente relevante militarmente. Isso ocorre principalmente pela existência de dependência tecnológica entre países, ou seja, países adquirem todo um aparato de outros, que possuem a capacidade de desenvolver esses sistemas e equipamentos.

A partir desses conceitos pode-se inferir a conjuntura na qual o Brasil se encontra no cenário internacional. Apesar de possuir um investimento em defesa considerável, e que existam incentivos a sua Base Industrial de Defesa, para elaboração de projetos de maior complexidade, o país se encontra forçado a recorrer a parceiros internacionais para que seja possível elaboração e condução do processo de desenvolvimento e construção, com ou sem transferência de tecnologia. Exemplos na própria MB podem ser elencados como: o Programa

de Submarinos, desenvolvido com o Naval Group (França) e Programa Fragatas Classe “Tamandaré” (FCT), desenvolvido com o thyssenkrupp Marine Systems (Alemanha).

A partir da tabela 3, é possível notar a grande disparidade entre os países pesquisados. Os EUA despontam como país menos dependente de fornecimento estrangeiro, sendo o único com a comparação percentual abaixo de dez. A Rússia vem em seguida com a cifra de 15.6 por cento. Pode-se observar um fator relevante: a dependência de armamentos militares e, por conseguinte, de tecnologia militar estrangeira não é um fator de exclusividade de países em desenvolvimento. O Japão, por exemplo, apesar de contar com uma economia sólida e possuir indústrias de ponta de diversos tipos, é extremamente dependente de importações de caráter militar.

Tabela 3- Relação (em %) entre as importações e exportações de armas

<b>País</b>	<b>Total de importações como percentual do total de exportações</b>
EUA	4.8
Reino Unido	50.0
França	27.5
Japão	15000.0
Alemanha	68.4
Rússia	15.6
Itália	184.2
Canadá	181.8
Coreia do Sul	1100.0
Israel	400.0
China	210.0
Índia	7000.0
África do Sul	166.6
Espanha	1071.43
Suécia	34.07
Suíça	2200.0
Taiwan	13000.0
Turquia	4571.0
Grécia	2111.12
Portugal	US\$ 60 milhões em importações e sem exportações

<b>País</b>	<b>Total de importações como percentual do total de exportações</b>
Polônia	133.3
Coreia do Norte	21.4
Paquistão	10000.0
Egito	US\$ 700 milhões em importações e sem exportações
Irã	1500.0
Brasil	900.0

Fonte: Neuman, 2006 apud Özkan, 2008.

Özkan (2008), apresenta um panorama das principais empresas produtoras de equipamentos de defesa utilizando como critério comparativo os seus faturamentos. Dentre as vinte primeiras, treze são norte americanas e as demais pertencem a países europeus: duas do Reino Unido, duas da França, Itália e Suécia possuem uma cada e outra é pertencente a um conglomerado de países. Esses dados são corroborados pela pesquisa de Correa Filho *et al.* (2013), que demonstra pequenas mudanças nesse panorama no hiato de aproximadamente cinco anos.

Essas informações mostram que existe um domínio, largamente liderado pelos EUA, em relação à produção e venda de tecnologia militar, e que países europeus também possuem grandes capacidades nesse sentido. Países como Rússia e China, apesar de possuírem grandes capacidades em tecnologia militar, não têm grandes empresas figurando entre as maiores do espectro até o período de realização das pesquisas. Isso ocorre, possivelmente, por deterem uma maior tutela governamental sobre o setor tecnológico de defesa nacional.

Correa Filho *et al.* (2013) apresenta um ranqueamento de equipamentos militares mais comercializados. A categoria “sensores”, onde se enquadram os radares *phased array* abordados neste trabalho, ocupa a quinta posição dentre as mais vendidas entre países. Destaca-se, com isso, que, dentre partes componentes de um sistema, é a principal tecnologia comercializada, já que, como critério foram introduzidos na mesma classificação elementos como: aeronaves, navios, mísseis, veículos de combate, entre outros. Ou seja, como elemento funcional de um sistema mais complexo, os sensores são a principal categoria comercial em escala global.

Por meio da pesquisa de Correa Filho *et al.* (2013) também é possível verificar empresas que atuam em território brasileiro no ramo de sensores em geral. Seus principais produtos são voltados para desenvolvimento e fabricação de radares voltados para utilização por aeronaves ou meteorológicos. Não sendo possível verificar o nível de pesquisa e desenvolvimento e dos produtos gerados pelas empresas em foco, observa-se que uma delas faz parte do grupo Thales (França).

É válida a verificação do que é preconizado em documentos estratégicos nacionais brasileiros quanto a necessidade da nacionalização de meios, sistemas e capacidades de defesa. O país tem optado pela aquisição de meios de defesa, prioritariamente, com a transferência de tecnologia. No entanto, a transferência tecnológica não se configura como fator que assegure o sucesso no processo de nacionalização do desenvolvimento de um item, fazendo-se necessário a contínua capacitação de pessoal e a manutenção da demanda.

A Estratégia Nacional de Defesa (END) brasileira prevê que o Setor de Defesa deve estimular o desenvolvimento de capacidades nacionais, e com isso escalar o gerar melhorias no nível de Poder Nacional, que é caracterizado pela conjugação de recursos para alcançar determinada finalidade (Brasil, 2016).

A END atrela o desenvolvimento do país, de maneira geral, com fortalecimento da Base Industrial de Defesa (BID), de forma que, com a configuração dos fatores necessários para o desenvolvimento e construção de meios, sejam humanos ou de infraestrutura, hajam ganhos percebíveis em outros aspectos. O aparato de defesa deve estar sintonizado com o que há de mais desenvolvido no que concerne tanto a práticas quanto a desenvolvimento tecnológico, o que exige que existam condições de pessoal e de material para manter o desenvolvimento científico e tecnológico nacional no mais alto nível (Brasil, 2016).

A BID deve ser formada por organizações privadas e governamentais, com pessoal civil e militar, capazes de desenvolver pesquisas, projetos, produção, reparos, modernização e outras tarefas, relacionadas a produtos de defesa. Esses entes podem possuir aspectos comerciais, principalmente com a função de proporcionar níveis de segurança de produção em relação a demanda e competitividade no mercado externo. Entretanto, o aspecto comercial deverá estar subordinado a necessidades estratégicas (Brasil, 2016).

A busca por parcerias estratégicas com outros países deve ser uma prioridade, buscando-se capacitar e consolidar a capacidade de desenvolver e fabricar produtos de defesa, minimizando-se a dependência da importação de componentes críticos, produtos e serviços. Ou seja, parcerias deverão sempre ter como prioridade o fortalecimento das capacidades autônomas nacionais (Brasil, 2016).

O Plano Estratégico da Marinha (PEM) elenca como desafio a ser superado a sua independência tecnológica no que se refere a meios, sistemas e equipamentos de defesa, ou seja, a efetiva superação da necessidade de obtenções desse tipo serem realizadas junto a entes internacionais (Marinha do Brasil, 2020).

A Marinha do Brasil será uma Força moderna, aprestada e motivada, com alto grau de independência tecnológica, de dimensão compatível com a estatura político-estratégica do Brasil no cenário internacional, capaz de contribuir para a defesa da Pátria e salvaguarda dos interesses nacionais, no mar e em águas interiores, em sintonia com os anseios da sociedade (Marinha do Brasil, 2020, p. 51).

Ao se realizar uma correlação dos dados apresentados com as perspectivas estratégicas do Brasil e da MB, elencadas por documentos próprios, percebe-se que há um caminho para que sejam alcançados os objetivos e pontos de inflexão a serem ultrapassados.

## **5.2 Sistemas de radar utilizados pelas marinhas**

A partir da análise dos sistemas de radar utilizados (ou em vias de ser) pelos navios de escolta ou destróieres de algumas nações, pode ser realizada uma comparação adequada e ser verificada uma tendência ou a situação consolidada em que se encontram. Como critério para seleção dos países foram utilizados os que possuem assento permanente no Conselho de Segurança da ONU e empresas de cunho tecnológico de defesa, voltadas à temática abordada, ou seja, EUA, Reino Unido e França, países que possuem histórico de relações comerciais com o Brasil a partir da perspectiva de venda de meios militares. Da mesma forma, é realizada a verificação do que poderá vir a ser futuramente utilizado pela MB, na figura do Programa FCT.

### **5.2.1 SPY-6 – Estados Unidos da América**

Com seu projeto de desenvolvimento datado do início dos anos 2000, possui o objetivo principal de fornecer capacidade de defesa aérea, defesa contra mísseis balísticos e operações de guerra de superfície. Sua instalação está prevista para acontecer na nova geração dos destróieres Flight III Arleigh Burke da Marinha dos EUA. A empresa norte-americana Raytheon é a fabricante desse sistema, e recebeu em 2013 um aporte inicial de cerca de US\$ 387 milhões para desenvolver o projeto. O novo sistema possui uma potência superior e capacidade de rastrear até trinta vezes mais alvos que o SPY-1, de primeira geração (Missile Threat, 2023).

Trata-se de um sistema radar AESA que, além das capacidades já elencadas, com rastreamento extremamente preciso, também poderá ser utilizado para realização de medidas

de ataque eletrônico (MAE), sendo eficiente principalmente contra alvos aéreos, utilizando feixes direcionais de alta potência (Missile Threat, 2023).

O sistema será produzido em algumas versões, cada uma com objetivo de equipar diferentes tipos de navios com variadas missões, como porta-aviões e navios anfíbios, que já possuem versões instaladas aguardando testes a serem realizados entre os anos de 2023 e 2024. No segundo semestre de 2023 foi lançado o USS Jack H. Lucas (DDG 125), primeiro destróier da série Flight III já equipado com o SPY-6(V)1, que será utilizada nos demais navios deste tipo (Raytheon, 2023).

Essa versão possui quatro faces, isto é, quatro arranjos planares fixos, cada uma com trinta e sete elementos transmissores/ receptores com circuitos integrados a base de nitreto de gálio (GaN) – evolução em relação aos anteriores à base de GaAs necessitando menos espaço, energia e resfriamento – capazes de fornecer consciência situacional em 360 graus (Missile Threat, 2023; Raytheon, 2023).

A fabricante afirma que com o início da utilização trarão melhorias consideráveis: “O SPY-6 é uma mudança de paradigma na tecnologia de radar, fornecendo aos marinheiros uma melhor consciência situacional, melhorou a defesa de mísseis balísticos, manutenção e tempo de inatividade reduzidos e alcance maior” (Raytheon, 2023, Online).

A figura 9 mostra o navio USS Jack H. Lucas, onde foi instalado o SPY-6(V)1, possuindo como suas principais funções: a defesa contra mísseis balísticos, mísseis de cruzeiro, ameaças de superfície e aéreas, *jamming* e guerra eletrônica (Raytheon, 2023).

Figura 9- USS Jack H. Lucas equipado com o SPY-6(V)1



Fonte: Raytheon, 2023.

### 5.2.2 Tipo 997 Artisan 3D – Reino Unido

O radar é empregado em meios da Marinha Real britânica, incluindo as suas fragatas Tipo 23, atualmente em uso, e possui previsão de ser empregado nas fragatas Tipo 26, desenvolvidas no programa britânico denominado Navio de Combate Global, e que serão a futura espinha dorsal da Força. Para serem empregados nos futuros navios, a BAE Systems realizou atualizações no radar Artisan 3D que passará a empregar a estabilização eletrônica frente a estabilização mecânica dos atuais, aumentando a velocidade em que o radar compensa movimentos do navio gerados pelo mar. Ao todo, vinte e seis navios da frota britânica deverão operar o radar Artisan 3D (Padilha, 2023).

A fabricante destaca as principais características do sistema de matriz única rotativa como:

a) Identificar um objeto do tamanho de uma bola de tênis, a uma velocidade de até três vezes a do som, a uma distância de até 25 km;

b) A distância de detecção indo de 200 m até 200 km, com sensibilidade suficiente para identificar pássaros tão bem quanto aeronaves e navios;

c) Rastrear mais de novecentos alvos simultaneamente; e

d) A antena rotativa do radar pesa menos de 700 kg, e é composta de materiais de fibra de carbono – objetivando uma menor necessidade de manutenção (BAE Systems, 2023).

O NAM “Atlântico”, ex-HMS Ocean, possui um radar Artisan 3D em operação. Sendo o radar mais moderno em uso na MB, foi adquirido junto com o meio naval, já estando instalado à época.

Devido às dificuldades encontradas para realização das manutenções no sistema, em 2022 a MB realizou com a BAE Systems um contrato para fornecimento de suporte para o radar, englobando também o sistema de combate do Navio, pertencente a mesma fabricante. O acordo incluiu a instalação de uma *help-desk*, operada remotamente do Reino Unido, com objetivo de oferecer suporte à distância. As funções principais do radar no NAM “Atlântico” são proporcionar vigilância de superfície e aérea, além de gerenciar o tráfego aéreo de asa fixa e rotativa (BAE Systems, 2023).

Com isso, pode-se considerar a BAE Systems como uma parceira estratégica da MB, fornecendo suporte à manutenção e funcionamento do radar do seu principal Navio, o Capitânia da Esquadra brasileira.

Figura 10- Antena do sistema Artisan 3D



Fonte: BAE Systems, 2023.

### 5.2.3 Sea Fire – França

O Sea Fire é um radar multifuncional AESA. Possuindo quatro painéis de antenas fixos, foi concebido para apoiar simultaneamente a defesa de navios contra ameaças convencionais e assimétricas, sendo capaz de realizar rastreamento de contatos empregando hipervelocidade e realizando manobras evasivas. Traz ainda recursos aprimorados de vigilância e direção de tiro (Thales Group, 2023).

O radar Sea Fire foi concebido para operar em plataformas que vão de fragatas leves até destróieres. Seus módulos T/R são baseados em circuitos a base de GaN, possuindo uma arquitetura moderna que possibilita redundância, degradação controlada e manutenção facilitada (Thales Group, 2023).

Possui capacidade de realizar simultaneamente tarefas de vigilância tridimensional de longo alcance, busca no horizonte, vigilância de superfície e controle de fogo. Desempenho aprimorado nas proximidades de terra, principalmente para lidar com futuros veículos aéreos não tripulados (VANTs) que possuam elevada capacidade de manobra. Foi desenvolvido, ainda, para prestar defesa contra mísseis balísticos táticos, realizando busca autônoma, rastreamento de alta precisão e controle de fogo. Tem ainda, a possibilidade de receber atualizações de *software* visando a criação de novas funcionalidades

para lidar com novas ameaças, não sendo necessárias mudanças estruturais (Thales Group, 2023).

O fabricante elenca algumas das principais características funcionais do sistema como:

- a) Distância de detecção aérea até 500 km e de detecção de superfície de até 80 km;
- b) Cobertura 360 graus em azimute e 90 graus em elevação;
- c) Capacidade de rastrear mais de oitocentos alvos simultaneamente, com atualização do tipo de rastreamento automaticamente adaptada às características do alvo; e
- d) Vigilância aprimorada para alvos em movimento lento, pequena seção reta radar, furtivos e supersônicos (Thales Group, 2023).

O Sea Fire será instalado na Fragata Almirante Ronarc'h desenvolvida pelo programa Fragatas de Defesa e Intervenção da Marinha Nacional francesa junto com o Naval Group (França), estando previsto que integre as demais, que se encontram em construção (Padilha, 2023).

Figura 11- Antenas do radar Sea Fire em fase de testes pré integração



Fonte: European Defense Review, 2023.

### 5.2.3 TRS-4D – Alemanha

O radar TRS-4D foi escolhido pela MB para equipar as futuras fragatas Classe “Tamandaré”. Fabricado pela empresa alemã Hensoldt, possui duas versões, uma com antena rotativa, que foi o escolhido, e outra com quatro matrizes planares fixas. Além da MB, o equipamento também foi escolhido para substituir os antigos radares das fragatas Tipo 23 da Armada chilena, em um projeto de modernização que vem sendo executado pela empresa norte-americana Lockheed Martin (Santos, 2022).

O TRS-4D com antena rotativa é um radar AESA multifuncional de vigilância e aquisição de alvos. Utiliza o GaN como componente de seus circuitos integrados. Possui integração mecânica e eletrônica facilitada, exigindo um baixo esforço de integração. Apresenta elevada capacidade operacional, possibilitando uma maior permanência dos meios. Também é possível que o sistema receba atualizações por meio de *software* tornando-o adaptável a novas necessidades que possam surgir para fazer frente a novas ameaças (Hensoldt, 2023).

O radar possui capacidade de iniciar o rastreamento de um alvo automaticamente por meio de uma única varredura eletrônica, gerando um alerta confiável e imediato. Isso ocorre com a classificação automática de alvos como ameaças de maior prioridade de acordo com parâmetros preestabelecidos. Devido a essa característica de maior rapidez de designação alvos, a qualidade do rastreamento torna-se superior, com alocação de um rastreamento direcionado (Hensoldt, 2023).

O sistema possui capacidade de calibrar todos os componentes da antena, provendo maior precisão no rastreamento, para ameaças aéreas e de superfície, convencionais ou assimétricos. Os diferentes recursos do radar permitem a realização de alguns tipos de varredura, resultando em uma classificação confiável de alvos. Possui recursos de contramedidas eletrônicas (CME), que garantem seu desempenho mesmo sob tentativa de bloqueio. É capaz de manter em funcionamento todas as funções simultaneamente, mesmo em cenários de saturação de alvos e com forte presença de ruído (Hensoldt, 2023).

As principais características funcionais do sistema TRS-4D são:

- a) Alcance de até 200 m até 250 km;
- b) Cobertura em azimute de 100 graus, com precisão de rastreamento inferior a 0,2 graus, e de elevação de 70 graus, com precisão de rastreamento inferior a 0,4 graus;
- c) Capacidade de detecção de seção reta radar inferior a 0.01 m<sup>2</sup>;
- d) Realizar o rastreamento simultâneo de mais de mil alvos; e
- e) Suporte para controle de tiro de até quatro equipamentos (Hensoldt, 2023).

Podem ser destacadas, ainda, sua função para detecção de explosão, ao realizar o controle de fogo, e a integração de uma antena IFF (*identification friend or foe* - identificação amigo ou inimigo), utilizada principalmente para identificação de aeronaves, sendo fundamental para distinguir forças amigas de inimigas (Hensoldt, 2023).

O projeto das FCT é baseado em modelo desenvolvido pela alemã thyssenkrupp Marine Systems e trabalha em conjunto com a Embraer Defesa e Atech (Thyssenkrupp, 2023).

Figura 12- Ilustração do Projeto FCT com o radar TRS-4D no seu mastro principal



Fonte: Thyssenkrupp, 2023.

## 6 CONCLUSÃO

Radars *phased array* são amplamente utilizados para aplicações civis e militares. Sobre o seu desenvolvimento, pôde-se observar que é uma temática ampla, exigindo níveis de pesquisa de bastante profundidade para que sejam possíveis obter avanços. Com as inovações alcançadas e novas capacidades geradas, é válido observar que os custos de investimento para obtenção de capacidade de produção tornam-se atrativos a longo prazo, além de permitir o objetivo principal que é a superioridade em capacidade de detecção, rastreamento e controle de armas. Com sua aplicabilidade a bordo dos navios mais modernos das marinhas dos países elencados, demonstrou-se que, atualmente, trata-se da tecnologia mais avançada em utilização.

A temática relacionada a sistemas de defesa, em particular os “sensores”, possui grande valia. Esses representam significativa parcela da probabilidade de êxito em uma situação de conflito, sendo pela obtenção antecipada dos dados de uma ameaça ou pela precisão com que são capazes de direcionar o armamento ou guiar um míssil.

Inicialmente, foi realizada uma verificação ampla dos fundamentos da tecnologia que deu origem aos radares operacionais e como se deu a sua evolução até o período onde passaram a haver pesquisas específicas sobre a tecnologia *phased array*. Foram então elencados os princípios de funcionamento básicos de um sistema radar genérico, apresentada a sua respectiva arquitetura e, então, realizou-se uma conceituação dos diferentes tipos de sistemas de radar e as suas aplicações.

Aprofundando-se no assunto de radares *phased array*, em específico, foi realizado o desenvolvimento correlacionando os avanços da tecnologia com a caracterização do seu funcionamento, bem como a explicação a respeito de motivações, itens inovadores e arquiteturas construtivas utilizadas, sendo a cada etapa possível notar avanços alcançados. Para isso, foi feita inicialmente a conceituação de radares *phased array* multifuncionais, com suas aplicabilidades e diferenciais, para em seguida realizar a apresentação de como foi possível se chegar e obter aqueles parâmetros, passando pelo desenvolvimento dos radares PESA e, após, dos radares AESA, sendo então realizada uma breve comparação entre os tipos.

Para uma melhor sintonização de informações do posicionamento do Brasil no cenário internacional de defesa, incluindo o mercado de sensores, foi realizada uma verificação de conceitos que mostram as características de países que possuem posição de destaque na esfera militar, e como o domínio sobre a produção tecnológica influencia nessa

condição. Ainda são elencadas projeções estratégicas brasileiras que demonstram o interesse nacional na nacionalização de tecnologias de defesa, bem como sua autossuficiência neste quesito. Por fim, é realizado um comparativo dos sistemas de radar que integram os meios mais modernos de alguns países de destacado posicionamento em relação a poderio militar, onde se verifica que, sem exceção, a tecnologia de radares AESA multifuncionais é empregada.

Por meio da pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho, foi possível verificar os diferenciais trazidos pela implementação de um radar *phased array*, em especial o radar AESA, que, associado ao seu atributo multifuncional, traz as capacidades de sensoriamento de uma plataforma naval a níveis superiores. Esse fato foi corroborado pela observação dos sistemas de radar utilizados nos navios mais modernos das forças navais dos países verificados, incluindo a sua utilização prevista em meios que se encontram em fase de projeto ou construção.

Depreende-se a partir da comparação apresentada que, para o ambiente de utilização operacional militar naval, o radar AESA multifuncional seria a melhor opção de sistema para um navio escolta ou destróier, que possuem tarefas de elevada complexidade e com grande necessidade de compilação de dados táticos. Isso se deve principalmente em virtude da grande gama de aplicabilidade do sistema, bem como, sua elevada capacidade de processamento de múltiplos alvos.

A escolha do radar Hensoldt TRS-4D pela MB para equipar as FCT fará suprir uma lacuna existente hoje nos escoltas da Força, elevando seu nível, capacidades e, provavelmente, gerando um rearranjo no guarnecimento de funções no mar. A redundância gerada pelo sistema também deve ser considerada vantajosa, já que, com a sua completa integração, pode desempenhar funções de sistemas que possuem aplicação específica.

No mesmo nível de importância da aquisição e utilização de um sistema de alto nível como esse, ficou demonstrada pela apreciação de textos apresentados a necessidade de se realizarem pesquisa e desenvolvimento na área de maneira a permitir ao país uma maior autonomia em relação às suas necessidades militares. Os sensores representam uma importante fatia do mercado, e atuam para possibilitar o funcionamento de outros sistemas que são vitais em combate, como lançadores de mísseis e canhões. Assim, uma maior independência tecnológica nessa área seria tão importante quanto outras em que se buscam avanços. A aquisição de sistemas estrangeiros, além de outros aspectos negativos, faz com que sua manutenção seja dificultada, já que empresas nacionais não trabalham com os componentes utilizados, resultando em um processo de degradação precoce do equipamento

que, para ser evitado, leva a formulação de contratos de manutenção, como ocorre com o radar Artisan 3D, do NAM “Atlântico”.

## 6.1 Considerações Finais

A observação de toda conjuntura de desenvolvimento dos radares *phased array* é similar a outras tecnologias inovadoras que vêm sendo desenvolvidas, utilizadas e comercializadas. A condução de pesquisa e desenvolvimento de ponta na área de defesa é importante por diversos fatores, principalmente, pelos produtos gerados, que garantem, a depender da sua inovação, superioridade tática e, possivelmente, estratégica para o seu detentor. Os radares AESA demonstram com clareza que trataram-se de investimentos de longo prazo, mas que trouxeram resultados substanciais. Seu emprego a bordo de navios de guerra otimiza em grande escala a capacidade sensorial do meio, demonstrado pela sua capacidade de desempenhar diversas tarefas. Além disso, o guarnecimento pode ser otimizado, com menos militares guarnecendo consoles, em sintonia com a redução de quantitativo de pessoal.

Com utilização dos radares AESA multifuncionais pelos países verificados, constata-se que são, atualmente, o nível máximo de desenvolvimento existente e em uso operacional para sistemas de radar. É notável, ainda, a observação de que, apesar de serem países que possuem aliança militar, por meio da Organização do Tratado do Atlântico Norte, operam radares desenvolvidos nacionalmente, por empresas que atuam estritamente no ramo de tecnologias de defesa. Ou seja, são, de certa forma, independentes tecnologicamente, o que é almejado pelo Brasil e, obviamente, pela MB. Para que isso seja um dia realizável, há um longo caminho a ser percorrido, a depender de investimentos e incentivos de uma política de estado a serem realizados em um processo planejado, contínuo e de longo prazo. Esse fomento é complexo e dependente de uma gama de fatores, mas essencial para que o Brasil se torne autossuficiente em defesa e capaz de ter o protagonismo internacional, diretamente relacionado ao poder militar, que sua estatura deve lhe conferir.

## 6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Como sugestão para trabalhos futuros considero válido o aprofundamento do tema a respeito da indústria nacional de sensores e quais seriam as suas capacidades e dificuldades encontradas ao se buscar o desenvolvimento de um radar AESA multifuncional nacional.

Outra possibilidade a ser desenvolvida, seria a abordagem do tema relacionando-o com sistemas de radar e meios que o Exército Brasileiro e/ ou Força Aérea Brasileira utilizam ou possam vir a utilizar, sendo interessante a apreciação de seu emprego em meios operativos, para o estabelecimento de comparativos com a MB.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, A. K. *et al.* Active Phased Array Antenna Development for Modern Shipboard Radar Systems. **Johns Hopkins Apl Technical Digest**, Baltimore, v. 22, n. 4, p. 600-613, 2001.
- AL-RASHID, Y. **Active Phased Array Radar Systems**. Nova Jersey: Lockheed Martin, 2009. Color. Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjgqffeq9-BAxWaLrkGHS6vBwYQFnoECC0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.icams-portal.gov%2Fresources%2Fofcm%2Fmpar%2Fmeetings%2Fsymposium%2Fworkshop%2FW2\\_Al-Rashid%2520Architecture.pdf&usg=AOvVaw1yaLGFFInY8-srRMRwM4yR&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjgqffeq9-BAxWaLrkGHS6vBwYQFnoECC0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.icams-portal.gov%2Fresources%2Fofcm%2Fmpar%2Fmeetings%2Fsymposium%2Fworkshop%2FW2_Al-Rashid%2520Architecture.pdf&usg=AOvVaw1yaLGFFInY8-srRMRwM4yR&opi=89978449). Acesso em: 18 set. 2023.
- B. FILHO, J. M. L.; G. NETO, S. F.; SOUSA JUNIOR, V. A. Aplicações em Radar: uma análise prospectiva. In: VIII FÓRUM DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 8., 2018, Parnamirim. **Fórum de Pesquisa e Inovação**. [s. l], 2012. p. 21-25.
- BAE SYSTEMS. **Artisan 3D radar**. Disponível em: <https://www.baesystems.com/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1668612780467&ssbinary=true>. Acesso em: 05 set. 2023.
- BAE SYSTEMS. **BAE Systems has signed a five-year contract to support its ARTISAN Radar on the Brazilian Navy's flagship, the multipurpose aircraft carrier NAM Atlântico**. 2022. Disponível em: <https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-new-artisan-radar-contract-for-brazil-flagship-nam-atlantico>. Acesso em: 08 out. 2023.
- BAE SYSTEMS. **BAE Systems' Artisan 3D radar system passes sea-based acceptance trials**. 2017. Disponível em: <https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems--artisan-3d-radar-system-passes-sea-based-acceptance-trials>. Acesso em: 08 out. 2023.
- BRASIL. Decreto nº 6703, de 2008. **Política Nacional de Defesa/ Estratégia Nacional de Defesa**. 3. ed. Brasília, DF, 2016. p. 1-37.
- CHADE, J. **Gasto militar bate novo recorde no mundo**. 2023. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/colunas/jamil-chade/2023/04/24/gasto-militar-bate-novo-recorde-no-mundo-sob-bolsonaro-investimento-caiu.htm>. Acesso em: 05 ago. 2023.
- CHAN, Y. K.; KOO, V. C. AN INTRODUCTION TO SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR). **Progress In Electromagnetics Research B**, Melaka, v. 2, p. 27-60, 2008.
- CHANG, I. The Rise of Active-Element Phased-Array Radar. **Rand**, Santa Monica, 1991.
- CORREA FILHO, S. L. S. *et al.* Panorama sobre a indústria de defesa e segurança no Brasil. **Bndes Setorial**, [s. l], v. 38, p. 373-408, 2013.

EUROPEAN DEFENSE REVIEW. **Thales digital radar, Sea Fire, qualified and ready for integration on France's future FDI frigates combat system.** 2021. Disponível em: <https://www.edrmagazine.eu/thales-digital-radar-sea-fire-qualified-and-ready-for-integration-on-frances-future-fdi-frigates-combat-system>. Acesso em: 11 out. 2023.

FENN, A. J. *et al.* The Development of Phased-Array Radar Technology. **Lincoln Laboratory Journal**, Lexington, v. 12, n. 2, p. 321-341, 2000.

GALANTE, A; POGGIO, G. **F40 aos Quarenta – sexta parte.** 2018. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/01/25/f40-aos-quarenta-sexta-parte/>. Acesso em: 13 out. 2023.

HENSOLDT. **TRS-4D Rotator:** multi-function surveillance and target acquisition radar. Multi-function surveillance and target acquisition radar. Disponível em: <https://www.hensoldt.net/products/radar-iff-and-datalink/trs-4d-rotator/>. Acesso em: 11 out. 2023.

HENSOLDT. **TRS-4D Rotator:** multi-functional surveillance and target acquisition radar. Multi-functional surveillance and target acquisition radar. 2018. Disponível em: <https://dam.hensoldt.net/m/1cc7b53da977b083/original/TRS-4D-Datasheet-english.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.

MAILLOUX, R. J. **Phased Array Antena Handbook.** 2. ed. Norwood: Artech House, 2005. 514 p.

MAIO, A.; FARINA, A. Cognitive Radar Signal Processing. **Nato Science And Technology Organization:** STO - Educational Notes Paper, La Spezia, p. 6.1-6.18, 09 ago. 2015.

MARINHA DO BRASIL. **Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040).** Brasília, DF, 2020. p. 1-92.

MISSILE THREAT. **Air and Missile Defense Radar (AMDR) / AN/SPY-6.** 2021. Disponível em: <https://missilethreat.csis.org/defsys/amdr/>. Acesso em: 30 set. 2023.

MOO, P. W.; DING, Z. Coordinated radar resource management for networked phased array radars. **Iet Radar, Sonar & Navigation**, Ottawa, v. 9, n. 8, p. 1009-1020, 01 ago. 2015.

ORMAN, A. J. *et al.* Scheduling for a multifunction phased array radar system. **European Journal Of Operational Research**, [s. l], v. 90, p. 13-25, 1996.

ÖZKAN, G. UNIPOLAR, BIPOLAR OR MULTIPOLAR INTERNATIONAL SYSTEM?: the defense industry factor. **Journal Of Management And Economics Research.** Istanbul, p. 104-123. 01 jul. 2008.

PADILHA, L. **Artisan 3D:** o poderoso radar da fragata type 26 da royal navy. O poderoso radar da Fragata Type 26 da Royal Navy. 2020. Disponível em: <https://www.defesaareanaval.com.br/naval/artisan-3d-o-poderoso-radar-da-fragata-type-26-da-royal-navy>. Acesso em: 08 out. 2023.

PADILHA, L. **Naval Group apresenta sua primeira Fragata FDI na presença da delegação da Grécia.** 2021. Disponível em:

<https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/naval-group-apresenta-sua-primeira-fragata-fdi-na-presenca-da-delegacao-da-grecia>. Acesso em: 10 out. 2023.

PHILLIPS, C. C. AEGIS: advanced multi-function array radar. **Johns Hopkins Apl Technical Digest**, Baltimore, v. 2, n. 4, p. 246-249, 1981.

POMPEO, B. *et al.* Comparação e Criação de Diagramas de Antena Phased Array Linear Utilizando Três Métodos Diferentes de Otimização. In: XXX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 12., 2012, Brasília. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**. Brasília: Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2012.

RAYTHEON. RTX Business. **SPY-6: a versatile and powerful radar in high demand.** A versatile and powerful radar in high demand. 2023. Disponível em:

<https://www.rtx.com/raytheon/news/2023/04/04/spy6-a-versatile-and-powerful-radar-in-high-demand>. Acesso em: 30 set. 2023.

RAYTHEON. RTX Business. **SPY-6: the future of naval defense has arrived.** The future of naval defense has arrived. 2023. Disponível em:

<https://www.rtx.com/raytheon/news/2023/10/04/spy6-the-future-of-naval-defense>. Acesso em: 30 set. 2023.

RAYTHEON. RTX Business. **U.S. Navy's SPY-6 Family of Radars.** Disponível em:

<https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/sea/spy6-radars>. Acesso em: 30 set. 2023.

RIDENOUR, L. N. (ed.). **RADAR SYSTEM ENGINEERING**. York: McGraw-Hill Book Company, 1947. 770 p.

SANTOS, A. T. RADAR 4D: o sensor escolhido para equipar as Fragatas Classe Tamandaré. **Revista Passadiço**, Niterói, v. 42, p. 62-64, 2022. Anual. Disponível em:

[https://www.marinha.mil.br/caaml/sites/www.marinha.mil.br.caaml/files/flipping\\_book/passadio\\_digital\\_2022\\_0/index.html#p=5](https://www.marinha.mil.br/caaml/sites/www.marinha.mil.br.caaml/files/flipping_book/passadio_digital_2022_0/index.html#p=5). Acesso em: 05 out. 2023.

SKOLNIK, M. I. (ed.). **RADAR HANDBOOK**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1990. 845 p.

SKOLNIK, M. I. (ed.). **RADAR HANDBOOK**. 3. ed. [S.L.]: McGraw-Hill, 2008. 1351 p.

THALES GROUP. **SEA FIRE: new full digital AESA multifunction radar family.** NEW FULL DIGITAL AESA MULTIFUNCTION RADAR FAMILY. Disponível em:

[https://www.google.com/url?](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjNquTftuyBaxUCG7kGH8QAYUQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fflight.com.gr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F05%2Fdatasheet-sea-fire-eng.pdf&usg=AOvVaw21kbvcyAre1lwLtlRvDkeu&opi=89978449)

[sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjNquTftuyBaxUCG7kGH8QAYUQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fflight.com.gr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F05%2Fdatasheet-sea-fire-eng.pdf&usg=AOvVaw21kbvcyAre1lwLtlRvDkeu&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjNquTftuyBaxUCG7kGH8QAYUQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fflight.com.gr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F05%2Fdatasheet-sea-fire-eng.pdf&usg=AOvVaw21kbvcyAre1lwLtlRvDkeu&opi=89978449). Acesso em: 10 out. 2023.

THALES GROUP. **SEA FIRE**. Disponível em: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/naval-forces/above-water-warfare/sea-fire>. Acesso em: 30 set. 2023.

THINK AUTONOMOUS. **How RADARs work**: a look at radio detection and ranging. A look at Radio Detection And Ranging. 2020. Disponível em: <https://www.thinkautonomous.ai/blog/how-radars-work/>. Acesso em: 26 ago. 2023.

THUMM, M. Historical German contributions to physics and applications of electromagnetic oscillations and waves. In: **Proc. Int. Conf. on Progress in Nonlinear Science, Nizhny Novgorod, Rusia**. 2001. p. 623-643.

THYSSENKRUPP MARINE SYSTEMS. **Tamandaré frigate keel laying marks innovation in military shipbuilding in Brazil**. 2023. Disponível em: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/newsroom/press-releases/press-detail-page/tamandare-frigate-keel-laying-marks-innovation-in-military-shipbuilding-in-brazil-183426>. Acesso em: 12 out. 2023.

VAN GENDEREN, P. STATE-OF-THE-ART AND TRENDS IN PHASED ARRAY RADAR. In: **PERSPECTIVES ON RADIO ASTRONOMY : TECHNOLOGIES FOR LARGE ANTENNA ARRAYS**, 1., 1999, Dwingeloo. **Artigo**. Dwingeloo: Astron, 2000.

WEI, Y. Review of the Evolution of Phased-Array Radar. **Shs Web Of Conferences**, [S.L.], v. 144, p. 02008, 2022. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/shsconf/202214402008>.