

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

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
GUERRA ELETRÔNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RADARES “*PHASED-ARRAY*”: características e aplicabilidades no atual cenário de Guerra
Eletrônica



1º Ten KLINGER LUIZ DA COSTA FREITAS

Rio de Janeiro
2021

1º Ten **KLINGER LUIZ DA COSTA FREITAS**

RADARES “*PHASED-ARRAY*”: características e aplicabilidades no atual cenário de Guerra Eletrônica

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

Orientador:
CT Milton Thiago Batista Carvalho

CIAW
Rio de Janeiro
2021

FOLHA DE APROVAÇÃO1º Ten **KLINGER LUIZ DA COSTA FREITAS**RADARES "*PHASED-ARRAY*": características e aplicabilidades no atual cenário de Guerra Eletrônica

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

Aprovada em 19/05/2021

Banca Examinadora:

CT Milton Thiago Batista Carvalho – CIAW



CT Othon Victor Marques de Sá – SEGCOL



Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia, PhD – PUC Rio

CIAW
Rio de Janeiro
2021

Dedico este trabalho àqueles militares das Forças Armadas do Brasil que através de seu trabalho contribuem para o aprimoramento da mentalidade de Guerra Eletrônica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me concedido sabedoria e perseverança para me dedicar diuturnamente ao Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica para Oficiais da Marinha do Brasil e, assim, alcançar meus objetivos profissionais.

À minha noiva Taís, por ter demonstrado apoio incondicional durante todo o trajeto percorrido neste curso. Ao meu irmão Klismann, por todo suporte e conselhos nos momentos de dificuldade. Aos meus pais, pelo amor incondicional e carinho.

Ao meu orientador, Capitão-Tenente Milton, pelas conversas, orientações e pelo tempo dispensado em contribuição à confecção deste trabalho.

E, por fim, aos nobres companheiros de turma pelo excelente convívio e momentos de descontração.

Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito para ser insignificante.

Augusto Branco

RADARES “*PHASED-ARRAY*”: características e aplicabilidades no atual cenário de Guerra Eletrônica

Resumo

Aclamado como um dos maiores avanços tecnológicos de todos os tempos, o sistema de radares com tecnologia *phased-array* remodelou a conduta de combate nos conflitos em que foi empregado. Cada vez mais, esse sistema, com alto poder dissuasório, tornou-se parte dos arsenais militares ao redor do mundo. Outrossim, a proliferação de modernos radares *phased-array* e a busca pelo domínio dessa tecnologia aumentam consideravelmente a cada ano, principalmente pela incrível capacidade de rastreamento simultâneo de uma enorme quantidade de alvos; por ter ajuste adaptável ao formato da plataforma onde será fixada; e, possuir uma suave degradação em caso de avarias de seus elementos irradiantes. Com efeito, esses radares têm garantido o diferencial tático e estratégico no cenário internacional, tornando os demais modelos pouco competitivos. Esta monografia, fruto de pesquisa bibliográfica e documental associada à análise descritiva/explicativa, visa apresentar as características e especificidades dos radares *phased-array* e suas variantes, bem como os benefícios e a importância estratégica agregada a este tipo de tecnologia para o desenvolvimento do País e do Poder Naval. Em adição, expor as preeminentes tendências tecnológicas atinentes ao assunto e alguns dos mais relevantes radares *phased-array* difundidos pelo mundo em correlação aos utilizados na Marinha do Brasil. Para bem compreender o tema, serão abordados também os elementos indispensáveis ao conhecimento sobre essa tecnologia: um breve apanhado histórico, princípios de funcionamento, funções empregadas, possibilidades de arranjos e arquiteturas de matrizes. Por fim, uma breve exposição referente ao Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul e as perspectivas da MB perante tais tecnologias, bem como o atual cenário nacional no setor de Pesquisa e Desenvolvimento. Isso permitiu comensurar a importância dada por diversos países a esses radares e entender por que o Brasil deve envidar esforços a fim de evoluir a tecnologia nacional existente e ampliar a quantidade de radares que possui.

Palavras- chave: Radar. *Phased-Array*. Feixes Direcionáveis. RAN-20S. Artisan 3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Princípio básico de um radar	17
Figura 2.2 - Principais elementos do processo de transmissão / recepção radar	18
Figura 2.3 - Cobertura volumétrica de busca usando uma série de posições de feixe discretas	22
Figura 2.4 - Exemplo de filtragem de acompanhamento para suavizar uma série de medições de posição individuais	24
Figura 3.1 - Proposta de radar de matriz de fase híbrida da década de 1950 que combinava configurações de matriz de antenas escaneadas mecanicamente e eletronicamente	27
Figura 3.2 - AN / APG-81 (AESA)	32
Figura 3.3 - Onda plana com ângulo θ que se cruza com uma matriz de cinco elementos	33
Figura 3.4 - Antena do radar 3D de defesa aérea alemão RRP-117	34
Figura 3.5 - Deslocadores de fase inseridos após os elementos de radiação para fazer a varredura eletrônica do feixe	36
Figura 3.6 - Modelo de um conjunto de matrizes lineares	38
Figura 3.7 - Distribuição de energia resultante da iluminação de uma matriz conformada em uma esfera	39
Figura 3.8 - Linha do tempo do desenvolvimento de programas americanos com tecnologia <i>phased-array</i>	40
Figura 3.9 - A matriz passiva usa um PA para conduzir toda a matriz e um LNA para definir a figura de ruído	41
Figura 3.10 - Um AESA possui um PA e um LNA atrás de cada radiador. Esses dispositivos são geralmente embalados em um módulo T/R	43
Figura 3.11 - Formação de feixe com <i>subarrays</i> digitais	45
Figura 3.12 - 2D <i>Array</i> com 902 elementos agrupados em 32 submatrizes	46
Figura 5.1 - Calibração de matrizes por fotônica	50
Figura 5.2 - Integrador óptico com diodo a laser	51
Figura 5.3 - Matriz de transmissão MIMO com três feixes na mesma direção	54
Figura 5.4 - Antena multifuncional multifeixe de banda larga	55
Figura 5.5 - Matriz de fase digital em rede sem fio	55
Figura 5.6 - Painéis das antenas do radar AN/SPY-1D (V) octogonais cinza claro localizados na frente da superestrutura do navio japonês JS Ashigara (DDG-178)	59
Figura 5.7 - Versões do Radar AN / SPY-1	60
Figura 5.8 - Visão geral do Sistema AN / SPY-6	62
Figura 5.9 - Visão operacional do AN / SPY-6 AMDR	63
Figura 5.10 - Fragata F222 Baden-Württemberg equipada com o radar TRS-4D com antenas fixas	64
Figura 5.11 - Porta-aviões de propulsão nuclear USS George Washington (CVN-73)	65
Figura 5.12 - EMPAR Radar no <i>destroyer</i> italiano Andrea Doria (D-553)	67
Figura 5.13 - Radar M200 embarcado em viatura do EB	69
Figura 5.14 - Radar RAN-20S	70
Figura 5.15 - Arte representando o radar Artisan 3D em operação no NAM “Atlântico”	71
Figura 5.16 - Antena do Radar Artisan 3D	72
Figura 5.17 - Integração do SisGAAz	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Apresentação do Problema	12
1.2 Justificativa e Relevância	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Etapas do Trabalho	14
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM RADAR GENÉRICO	16
2.1 Princípio Básico de Funcionamento	17
2.2 Faixas de Frequências de Operação	19
2.3 Funções Básicas	21
2.3.1 Busca / Detecção	21
2.3.2 Acompanhamento	23
3 VISÃO GERAL SOBRE OS RADARES <i>PHASED-ARRAY</i>	26
3.1 Apanhado Histórico	26
3.2 Características Gerais dos Radares <i>Phased-Array</i>	31
3.2.1 Antenas <i>Phased-Array</i> e seu Princípio de Funcionamento	32
3.2.2 Deslocadores de Fase (<i>Phase Shifters</i>)	35
3.2.3 Possibilidades de Arranjos de Antenas <i>Phased-Array</i>	37
3.2.3.1 Matriz Linear (<i>Linear Array</i>)	37
3.2.3.2 Matriz Planar (<i>Planar Array</i>)	38
3.2.3.3 Matriz Circular (<i>Circular Array</i>)	38
3.2.4 Arquiteturas de Matrizes	39
3.2.4.1 Arquitetura de Matriz Passiva (<i>Passive Array</i>)	40
3.2.4.2 Arquitetura de Matriz Ativa (<i>Active Array</i>)	42
3.2.4.3 Arquitetura em Submatrizes Digitais (<i>Digital Subarrays</i>)	44
4 METODOLOGIA	47
4.1 Classificação da Pesquisa	47
4.1.1 Classificação Quanto aos Fins	47

4.1.2 Classificação Quanto aos Meios	47
4.2 Limitações do Método	48
4.3 Coleta e Tratamento dos Dados	48
5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
5.1 Tendências Tecnológicas	49
5.1.1 Fotônica e Fibras Ópticas	49
5.1.2 Arquitetura <i>Array</i> Completamente Digital	51
5.1.3 Metamateriais	52
5.1.4 Radares de Múltiplas Entradas e Saídas (MIMO)	53
5.1.5 Antenas Multifuncionais e de Abertura Compartilhada	54
5.1.6 Redes de Formação de Feixes sem Fio (<i>Wireless</i>)	55
5.1.7 Algoritmo Genético	57
5.2 Sistemas Navais com Radares <i>Phased-Array</i>	58
5.2.1 Radar AN / SPY-1	58
5.2.2 Radar AN / SPY-6 AMDR	61
5.2.3 Radar TRS-4D	63
5.2.4 Radar AN / SPS-74 (V)	64
5.2.5 Radar EMPAR	66
5.3 Sistemas Navais com Radares <i>Phased-Array</i> em Operação no Brasil	67
5.3.1 Radar SABER M200	68
5.3.2 Radar RAN-20S	69
5.3.3 Radar ARTISAN 3D (<i>Type 997</i>)	70
5.4 O Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul e as Perspectivas da Marinha do Brasil face ao uso dos Radares <i>Phased-Array</i>	74
5.5 Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)	76
6 CONCLUSÃO	78
6.1 Considerações Finais	79
6.2 Sugestões para futuros trabalhos	80
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o ser humano é posto constantemente ao desafio de evoluir suas capacidades de vigilância. Desde os mais longínquos tempos, foram desenvolvidos equipamentos e artifícios com atribuições variadas, de acordo com a tecnologia vigente e os tipos de conflitos em que eram empregados. Durante a segunda guerra mundial, por exemplo, marco na história da humanidade, gerou-se um salto substancial nas capacidades de combate e vigilância, decorrente da ligação estreita entre as demandas militares e os avanços tecnológicos, conforme afirma o Almirante Guerra (2015).

A partir de então, com o avanço e aprimoramento inexorável das tecnologias bélicas durante os conflitos subsequentes, a necessidade latente de sensores cada vez mais eficazes e eficientes tornou-se um objetivo imprescindível aos principais países do globo. Por sua vez, os radares aperfeiçoaram-se como um sistema admirável, capaz de minar as medidas de sigilo inimigas e ganharam demasiada notoriedade com seus feitos; desta maneira, inserem-se também nesse contexto as evoluções desse sistema, como é o caso dos radares com tecnologia de varredura eletrônica e matrizes faseadas (*phased-array*).

A progressão revolucionária da era eletrônica trouxe uma dimensão totalmente nova à guerra naval. Os navios de guerra agora precisam enfrentar uma ampla gama de ameaças, desde minas simples até mísseis pequenos de alta velocidade e letalidade. Essas ameaças evoluíram exponencialmente e, à medida que cresceram, também foi aumentada a percepção de que os recursos para combatê-las são limitados e devem ser escolhidos com sabedoria.

Neste afã, o desenvolvimento da direção eletrônica em matrizes faseadas tem sua origem na exigência de defesa contra mísseis balísticos e de escanear grandes volumes de espaço para corpos de reentrada, bem como rastrear vários objetos para gerenciamento de batalha. A rápida varredura mecânica com grandes antenas de alta potência em setores de larga angulação não era mais uma opção viável (HERD, 2015).

Conforme aponta Jenn *et al.* (2009), as antenas *phased-array* são geralmente a arquitetura de antenas escolhida para a maioria dos sistemas modernos de radar. Os arranjos em fases consistem em uma coleção de antenas individuais que são arranjadas geometricamente e

excitadas (em fase) de modo a fornecer as características de radiação desejadas. Tradicionalmente, os elementos são conectados por um sistema de linhas de transmissão de microondas e divisores de energia (a rede de formação de feixes). Na prática, a rede de formação de feixes pode ser fisicamente grande e pesada se houver um grande número de elementos. Por exemplo, não é incomum que grandes matrizes de fase terrestres ou baseadas em navios tenham dezenas de milhares de elementos espaçados.

Quanto às aplicações militares, os arranjos em fase têm sido usados em áreas como desenvolvimento de radares, comunicações, guerra eletrônica (GE) e orientação de mísseis. Os sistemas *phased-array* desempenham um papel importante na definição do tipo de radar que serão instalados nas plataformas militares da próxima geração. Algumas das vantagens mais notáveis dessa tecnologia, segundo Hebert (2014), são fornecidas abaixo:

- a) Capacidade de rastrear vários alvos. Isso ocorre porque o *phased-array* é capaz de gerar vários feixes independentes ao mesmo tempo para rastrear diferentes objetos;
- b) Pode ser projetado para se ajustar ao formato da plataforma e, portanto, não afeta o desempenho aerodinâmico ou dinâmico da plataforma;
- c) Permite a degradação normal do desempenho quando alguns dos elementos da antena apresentam mau funcionamento; e
- d) Usado para aplicações de banda larga. Isso pode ser obtido ajustando-se os valores dos deslocadores de fase em diferentes frequências.

Neste sentido, o projeto de um sistema de radar *phased-array* é considerado complexo, pois envolve o controle de centenas ou às vezes milhares de elementos de antena. Os arranjos em fases geralmente custam mais do que os arranjos convencionais porque requerem um grande número de componentes especialmente projetados e integrados, como deslocadores de fase e elementos de antena (YONG, 2005).

Aos olhos de hoje, a Estratégia Nacional de Defesa (END) e a Política Nacional de Defesa (PND) apresentam consideráveis desafios no âmbito estratégico para a sociedade brasileira e, particularmente, para as Forças Armadas, no que tange ao preparo para a Defesa.

Um dos ambiciosos e grandes projetos de relevância listado na END é a concepção da nova classe de fragatas leves da Marinha do Brasil (MB), chamada de “Tamandaré”, que tem o propósito de realizar uma renovação na Esquadra com quatro navios modernos, de alta

complexidade, cotados para terem embarcados o aclamado radar multifunção *phased-array* ativo, Artisan 3D; com expectativa de entrada em serviço entre 2025 e 2028, de acordo com a Marinha do Brasil (BRASIL, 2021).

Faz-se mister salientar que a MB possui um Artisan 3D embarcado no Navio Aeródromo Multipropósito (NAM) “Atlântico”, incorporado em 2018. Ademais, esse não foi o primeiro radar *phased-array* na Marinha, e sim o RAN-20S presente nas Fragatas Classe “Niterói” e na Corveta Barroso; porém esse radar detém tecnologia *phased-array* passiva da década de 1990, comparativamente ultrapassada.

1.1 Apresentação do Problema

É indiscutível que a utilização de modernos radares *phased-array* traduz inúmeras vantagens para quem o utiliza, e por isso diversos países aplicam-se em desenvolver novas tecnologias cada vez mais apuradas e competitivas nessa área. Como mencionado anteriormente, o Brasil deu seu primeiro grande passo na aquisição do NAM “Atlântico” dotado do Artisan 3D; no entanto, é preciso discutir e apresentar, em pormenores, as características e aplicabilidades dessa tecnologia no atual cenário de GE.

Nesse contexto, de que forma os radares *phased-array* podem beneficiar os países detentores dessa tecnologia, dando enfoque ao Brasil, em um Teatro de Operações Navais?

1.2 Justificativa e Relevância

De modo a contribuir para a eficácia e eficiência do emprego dos meios navais na fase de aplicação do Poder Naval, torna-se oportuno um estudo sobre a utilização de radares *phased-array* pela MB, visando o acompanhamento do ritmo dinâmico das evoluções tecnológicas, bem como um aprimoramento bélico de dimensão compatível com a estatura político-estratégica do Brasil no cenário internacional. Em adição, é de vital importância o conhecimento sobre os mais modernos recursos de radares *phased-array*, a fim de se manter

em alto nível de interoperabilidade e deter dados para possíveis aquisições de novos equipamentos.

1.3 Objetivos

Compreender a importância dos radares *phased-array* no contexto internacional, do domínio dessa tecnologia, e as razões pelo qual o Brasil deve envidar esforços a fim de evoluir a tecnologia nacional existente.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa apresentar as características e especificidades dos radares *phased-array* e suas variantes, bem como os benefícios e a importância estratégica agregada a este tipo de tecnologia para o desenvolvimento do País e do Poder Naval. Em adição, expor alguns dos mais relevantes radares *phased-array* no mundo em correlação aos utilizados na MB e as conceituadas tendências tecnológicas relativas ao tema.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para compreensão do tema, será necessário lograr os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar um levantamento e revisão da literatura disponível sobre o tema;
- b) Realizar um levantamento histórico sobre a tecnologia radar;
- c) Conceituar e explicar o funcionamento do radar convencional;
- d) Conceituar e explicar o funcionamento dos radares *phased-array*;
- e) Apresentar os principais componentes, parâmetros, possibilidades de arranjos e arquiteturas utilizadas pelos radares *phased-array*;
- f) Apresentar as principais funções e modos de utilização dos radares *phased-array*;
- g) Apresentar as mudanças introduzidas pelos radares *phased-array* no Teatro de Operações Navais;
- h) Apresentar as vantagens e desvantagens dos radares *phased-array* e suas vertentes;
- i) Apresentar as preeminentes tendências tecnológicas atinentes ao tema;

- j) Apresentar os principais modelos de radares *phased-array* em utilização pelo mundo em paralelo aos utilizados pela MB;
- k) Apresentar os sistemas navais que utilizam essa tecnologia, bem como suas principais características e aplicabilidades;
- l) Realizar uma breve exposição referente ao Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz); e
- m) Avaliar as perspectivas da MB em relação a tal tecnologia, bem como o atual cenário do setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

1.4 Etapas do Trabalho

O capítulo 2 contextualiza as características gerais de um radar genérico; o princípio de funcionamento de uma transmissão e recepção do sinal; as faixas de frequência de operação que são utilizadas por radares no espectro EM; e, as funções básicas de busca / detecção e acompanhamento.

O capítulo 3 inclui uma visão geral sobre os radares *phased-array*. Apresenta um conciso apanhado histórico; as características gerais desses radares: abordagem sobre as antenas de matrizes faseadas e seu princípio de funcionamento; atuação dos deslocadores de fase (*phase shifters*); os arranjos de antenas mais utilizados, sejam lineares, planas ou circulares; e, as possibilidades de arquiteturas de matrizes, sejam passivas, ativas ou digitais.

O capítulo 4 trata do processo metodológico empregado na monografia. Para tal, foram definidas as classificações de pesquisa quanto aos fins e quanto aos meios, além de expor como se deu o colhimento de dados e informações atinentes ao assunto proposto, bem como as possíveis limitações dos métodos e atividades que foram utilizados.

O capítulo 5 aborda as tendências tecnológicas promissoras atinentes ao tema e que podem levantar problemas de projeto ou soluções para alguns requisitos de sistemas deficientes. Ademais, apresenta alguns dos mais notáveis sistemas de radares com tecnologia *phased-array* no mundo, em paralelo aos utilizados pela MB, bem como elucida suas peculiaridades; por fim,

realiza uma breve exposição referente ao SisGAAz e o atual cenário nacional no setor de P&D, correlacionado com as perspectivas da MB face ao uso dessas tecnologias.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas durante as pesquisas e a confecção da monografia, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros de forma que o material aqui exposto possa ser estudado e aprimorado para uma melhor compreensão sobre o tema.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM RADAR GENÉRICO

Para entendermos as características e funcionamento da tecnologia de radares *phased-array* de varredura eletrônica (*Electronically Scanned Array*, ESA) e seus derivados, faz-se necessário apresentar a definição de um sistema “radar” genérico, uma introdução abrangente quanto ao seu princípio básico de funcionamento e suas funções vitais. A intenção é fornecer ao leitor uma compreensão fundamental desses conceitos e identificar as principais questões no projeto e na análise de sistemas convencionais, que se prolongam até os radares *phased-array*.

De acordo com Skolnik (2008), radar é um sistema de detecção que usa ondas de rádio para determinar o alcance, o ângulo ou a velocidade dos objetos. Ele pode ser usado para detectar aeronaves, navios, espaçonaves, mísseis guiados, formações meteorológicas, terreno, entre outros objetos. Ou seja, radares são sensores eletromagnéticos (EM) para detecção e localização de alvos que reflitam ondas eletromagnéticas.

A frequência da energia EM usada para o radar não é afetada pela escuridão e também penetra nevoeiro e nuvens. Isso permite que os sistemas de radar determinem a posição de aviões, navios ou outros obstáculos invisíveis a olho nu devido à distância, escuridão ou clima (WOLFF, 2021).

Os sistemas de radar evoluíram em demasia desde seus primeiros dias, quando suas funções eram limitadas à detecção e determinação do alcance do alvo. Por isso, a palavra radar era originalmente uma sigla que significava detecção e alcance de rádio.

Os radares modernos, no entanto, são sistemas sofisticados que não apenas detectam alvos e determinam o alcance; podem ainda rastrear, identificar, gerar imagens e classificar os alvos enquanto suprimem fortes interferências indesejadas, como ecos do ambiente (conhecido como desordem) e contramedidas (*jamming*) (RICHARDS *et al.*, 2010). Os sistemas atuais aplicam essas principais funções de radar em uma gama cada vez maior de aplicações, desde o rastreamento militar e civil tradicional de aeronaves e veículos até o mapeamento bidimensional e tridimensional, prevenção de colisões, monitoramento de recursos terrestres e muitos outros.

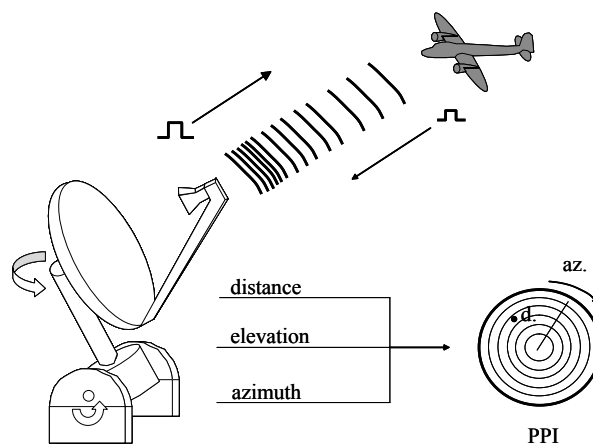
Basicamente, um radar consiste em um sistema elétrico com um transmissor produzindo ondas eletromagnéticas no domínio do rádio ou micro-ondas em direção a uma região de interesse e recebe e detecta essas ondas EM quando refletidas em objetos naquela região.

2.1 Princípio Básico de Funcionamento

O princípio eletrônico no qual o radar opera é muito semelhante ao princípio da reflexão de ondas sonoras. Ao conhecer a velocidade do som no ar, pode-se estimar a distância e a direção geral do objeto. O tempo necessário para o retorno de um eco pode ser aproximadamente convertido em distância se a velocidade do som for conhecida.

A energia de radiofrequência (RF) é transmitida e refletida do objeto refletor. Uma pequena parte da energia refletida retorna ao conjunto de radar. Os conjuntos de radar usam o eco para determinar a direção e distância do objeto refletivo (WOLFF, 2021).

Figura 2.1: Princípio básico de um radar



Fonte: Visser (2005).

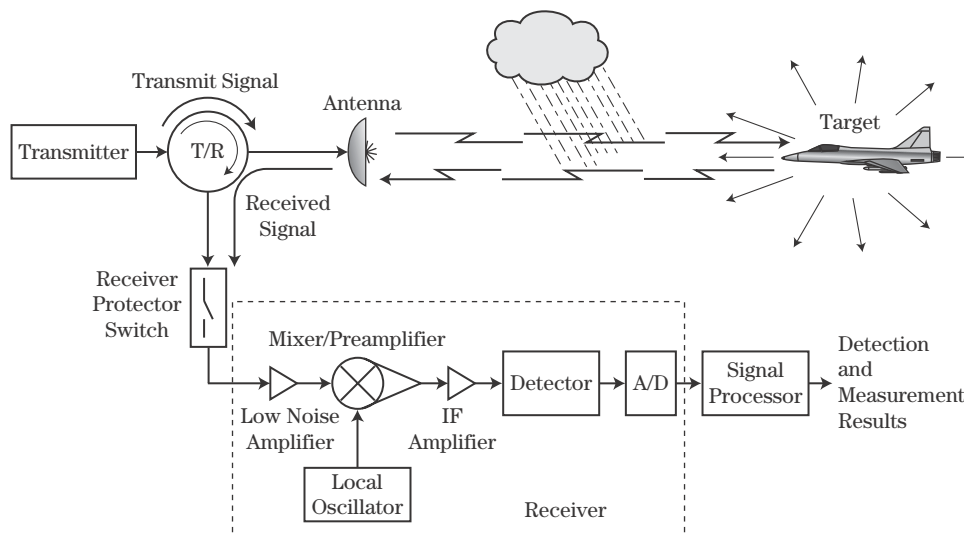
Uma antena diretiva é arquitetada de forma que possa ser movida (em azimute) e verticalmente (em elevação). Imediatamente após a transmissão de um pulso, a antena é desconectada e comutada ao receptor. O tempo entre um pulso ser transmitido e recebido é uma medida da distância do alvo. A distância é a metade desse tempo (o pulso viaja da antena até o

alvo, a reflexão viaja do alvo até a antena) multiplicada pela velocidade da luz. Uma vez que a antena é altamente diretiva, ou seja, transmitindo as ondas eletromagnéticas em um feixe estreito, a posição angular da antena indica a posição angular do alvo (HANSEN, 2009).

Quando a antena é girada e um tubo de raios catódicos fluorescentes (CRT) é configurado de tal forma que o feixe de elétrons desviado segue esta rotação, conforme representado na Figura 2.1, a posição angular na tela do Indicador de Posição de Plano (*Plan Position Indicator*, PPI) indica a posição do azimute do alvo e a distância pode ser lida nos círculos concêntricos na tela (VISSER, 2005). Assim, o centro da tela corresponde ao pulso transmitido e o raio da tela corresponde ao intervalo de tempo entre os pulsos transmitidos. A posição radial do eco na tela é, portanto, linearmente relacionada à distância que pode ser lida como uma fração do raio PPI.

No que tange à troca dos sistemas, define-se como “duplexer” o equipamento que alterna o arranjo entre os modos transmissor e receptor, com o intuito de utilizar apenas uma antena para ambas as funções. Essa comutação é necessária porque os pulsos de alta potência do transmissor destruiriam o receptor se a energia pudesse entrar no receptor (WOLFF, 2021).

Figura 2.2: Principais elementos do processo de transmissão / recepção radar



Fonte: Richards (2010).

Embora os detalhes de um determinado sistema de radar variem, os principais subsistemas devem incluir: transmissor, antena, receptor e processador de sinais (RICHARDS

et al., 2010). O sistema pode ser significativamente mais simples ou mais complexo do que o mostrado acima; no entanto, as funções desempenhadas pelos blocos estarão invariavelmente presentes. A figura 2.2 mostra os principais elementos envolvidos no processo de transmissão de um sinal de radar, propagação desse sinal pela atmosfera, reflexão do sinal do alvo e recepção dos sinais refletidos.

Com mais detalhes a respeito do processo de recepção: ao receber o sinal refletido, os componentes no receptor amplificam o sinal, convertem o sinal RF em uma frequência intermediária (IF) e, subsequentemente, aplicam o sinal a um conversor analógico-digital (ADC) e, em seguida, ao processador de sinais / dados (SKOLNIK, 2008). O detector é o dispositivo que remove a portadora do sinal de retorno do alvo modulado para que os dados do alvo possam ser classificados e analisados pelo processador de sinais.

Os sinais de alvo recebidos existem mesmo na presença de interferência. De acordo com Richards *et al.* (2010), a interferência vem em quatro formas diferentes: (1) ruído eletrônico interno e externo; (2) ondas EM refletidas de objetos que não são de interesse, frequentemente chamados de desordem, como já comentado; (3) ondas EM externas não intencionais criadas por outras fontes de fabricação humana, ou seja, interferência eletromagnética; e (4) bloqueio intencional de um sistema de contramedidas eletrônicas (CME), na forma de ruído ou alvos falsos. Determinar a presença de um alvo na presença de ruído, desordem e congestionamento é uma função primária do processador de sinal do radar.

2.2 Faixas de Frequências de Operação

Os projetos e modos de funcionamento de um sistema radar são influenciados diretamente pelas condições de propagação eletromagnética às quais estarão sujeitas no ambiente de operação.

Grande parte dos radares operam na faixas de frequência de microondas de 1 a 40 gigahertz (VISSER, 2005). Entretanto, encontram-se radares que operam nas mais diversas frequências; de megahertz até alguns que trabalham na faixa do espectro óptico, na ordem de terahertz.

Tabela 1: Faixas de frequências de operação

Designação da Banda	Faixa de frequência	Faixas específicas designadas pela UIT para radares
HF	3-30 MHz	-
VHF	30-300 MHz	138-144 e 216-225 MHz
UHF	300-1000 MHz	430-450 e 890-942 MHz
L	1-2 GHz	1,215-1,4 GHz
S	2-4 GHz	2,3-2,5 e 2,7- 3,7 GHz
C	4-8 GHz	5,25-5,925 GHz
X	8-12 GHz	8,5-10,68GHz
K _u	12-18 GHz	13,4-14 e 15,7-17,7 GHz
K	18-27 GHz	24,05-24,25 GHz
K _a	27-40 GHz	33,4-36 GHz
V	40-75 GHz	59-64 GHz
W	75-110 GHz	76-81 e 92-100 GHz
mm	110-300 GHz	126-142; 144-149; 231-235 e 238-248 GHz

Fonte: Elaborado pelo autor. Baseado em Skolnik (2008).

A tabela 1 lista as faixas de frequências que a União Internacional de Telecomunicações (UIT) aloca para utilização em radares. Conforme Skolnik (2008), torna-se oportuno salientar que a listagem apresentada precisa ser levada em consideração com prudência quanto ao dimensionamento e ao projeto de sistemas radar, tendo em vista que não se pode contar que realizações militares sigam à risca tais determinações da UIT; pois, dessa forma, haveria um maior grau de previsibilidade à respeito dos sistemas, o que certamente é indesejado em tecnologias de uso militar.

Quanto as principais bandas utilizadas pelos radares *phased-array*, a banda L é a preferida para a operação de radares de vigilância aérea de longo alcance, detecção de satélites e defesa contra mísseis balísticos intercontinentais (BARTON, 2005). Conforme a frequência aumenta, os efeitos da chuva no desempenho se tornam significantes, e devem ser levados em consideração no projeto de radares que operem próximo ao seu limite superior.

Sistemas na banda S obtêm uma vigilância de médio alcance (100 a 200 quilômetros), sendo capaz de realizar o acompanhamento de alvos a uma distância de 50 a 150 quilômetros com acurácia mediana.

Segundo Barton (2005), a partir de frequências na banda C, observa-se, além de vigilância e *tracking*, aplicações em guiagem de mísseis. Essa aplicação é permitida pela melhor acurácia, no entanto é limitada por influências meteorológicas.

A banda X é também muito empregada em aplicações militares. Sendo essa, bastante utilizada em radares embarcados em aeronaves, bem como radares de abertura sintética (SAR). Radares na banda X são de tamanho conveniente para aplicações nas quais mobilidade e baixo peso sejam importantes; e, alcance muito alto não seja um requisito (BARTON, 2005). A grande faixa de frequências disponíveis na banda X e a possibilidade de se obter larguras de feixe reduzidas com antenas relativamente pequenas a tornam interessante para aplicações que necessitem de alta resolução (HANSEN, 2009). Vale ressaltar que essa banda de frequências também é seriamente castigada por influências meteorológicas.

Conforme aumenta-se a frequência de operação, o tamanho físico das antenas diminui e, em geral, torna-se mais difícil gerar uma alta potência de transmissão (BARTON, 2005). Com isso, o alcance de radares em frequências acima da banda X é normalmente menor que os dessa banda. De acordo com Visser (2005), é possível verificar também que à medida em que a frequência de operação aumenta, a resolução melhora; no entanto, o alcance máximo e a imunidade à fenômenos atmosféricos ficam comprometidos.

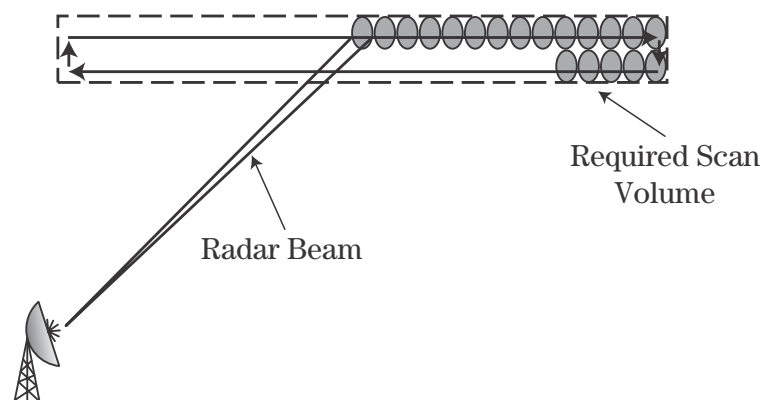
2.3 Funções Básicas

Embora existam centenas de diferentes tipos de radares em uso, a grande maioria tem três funções básicas: (1) busca / detecção; (2) acompanhamento; e (3) representação por imagem. As funções 1 e 2 serão brevemente discutidas agora.

2.3.1 Busca / Detecção

A maioria dos radares têm como função vital a busca por alvos sem informações preestabelecidas sobre a presença ou posição desse (LILLY, 2000). O radar realiza essa busca apontando sua antena em uma sucessão de posições de feixe que cobrem coletivamente o volume de interesse. Uma antena de escaneamento mecânico se move continuamente pelo volume determinado, um exemplo dessa abordagem é o movimento de uma antena giratória. Na égide das antenas de tecnologia ESA, assunto que será melhor detalhado no decorrer deste trabalho, uma antena pode ser apontada para uma série de posições de feixe discretas, como sugerido na figura abaixo.

Figura 2.3¹: Cobertura volumétrica de busca usando uma série de posições de feixe discretas



Fonte: Richards (2010).

Em cada posição, um ou mais pulsos são transmitidos e os dados recebidos são examinados para detectar quaisquer alvos presentes. Por exemplo, 10 pulsos podem ser transmitidos em uma posição de feixe de um *phased-array*. Conforme abordado por Visser (2005), os dados detectados de cada pulso podem então ser integrados de forma não coerente, ou seja, somados em cada faixa de intervalo para melhorar a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR). Esses dados integrados são então comparados com um limite definido apropriadamente para tomar uma decisão de detecção para cada faixa de alcance. Após isso, a antena é direcionada para a próxima posição do feixe e o processo é repetido. Este procedimento é continuado até que todo o volume de busca tenha sido testado, momento em que o ciclo é repetido.

¹ Tradução nossa: Feixe radar (*Radar beam*); Volume de varredura desejado (*Required Scan Volume*).

A SNR pode ser maximizada aumentando a frequência transmitida, que por sua vez aumenta o ganho da antena, ou também aumentando o tempo em que a antena rastreia o alvo, coletando mais energia do mesmo (MICHELI, 1996).

Um grande problema da fase de busca é a quantidade de tempo necessária para uma varredura completa do volume desejado. Conforme leciona Richards (2010, tradução nossa):

O tempo de busca é uma função do volume total de busca, as larguras do feixe da antena e o tempo de permanência gasto em cada posição do feixe. Este último, por sua vez, depende do número de pulsos a serem integrados e da cobertura de alcance desejada, que afeta a frequência de repetição de pulso (FRP). A otimização do processo de busca envolve trocas detalhadas entre o tamanho da antena (que afeta as larguras do feixe e, portanto, o número de posições de feixe necessárias), o tempo de permanência (que afeta o número de pulsos disponíveis para integração) e o cronograma total de busca do radar.

Dentre todos esses fatores determinantes para os parâmetros da função de busca, o alcance de detecção é, talvez, o fator mais importante. Este requisito define o tamanho relativo e a complexidade do radar, que, por sua vez, determina seu custo (MICHELI, 1996).

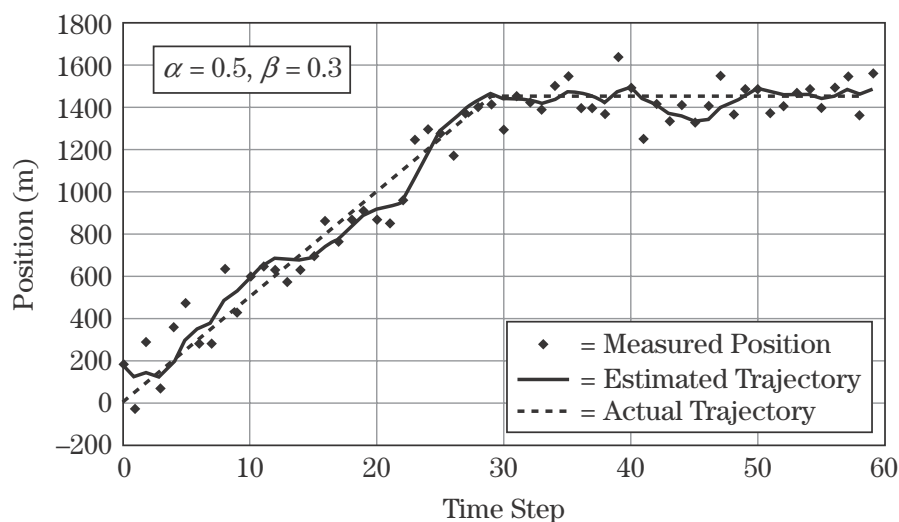
2.3.2 Acompanhamento

No entendimento de Skolnik (2008), uma vez que um alvo é detectado em um determinado volume de busca, é realizada então uma medição do estado do alvo, isto é, calculada sua posição em alcance, ângulo de azimute e ângulo de elevação; e, frequentemente, sua componente radial de velocidade. Os radares de acompanhamento medem os estados dos alvos em função do tempo. Medições de posições individuais são então combinadas e suavizadas a fim de estimar uma posição futura deste alvo.

Segundo Micheli (1996), a função de rastreamento é aquela que fornece as informações que permitem um armamento engajar e destruir alvos. Esta função é influenciada por diversos fatores, como o alcance da arma e a área de cobertura, tipo de guiamento da arma, eficácia do armamento, cadência de disparos, número de alvos a serem engajados e a finalidade do sistema de armas.

O acompanhamento implica medir a posição e a velocidade de um alvo com uma precisão melhor do que a resolução do radar². Uma variedade de técnicas são usadas para fazer isso. Por exemplo, a posição do azimute pode ser estimada em uma fração da largura do feixe do azimute da antena em um radar de varredura mecânica medindo a nitidez do alvo detectada em vários pulsos sucessivos conforme a antena faz a varredura; e, em seguida, computando o centróide das medições resultantes (MAILLOUX, 2017). Conceitos semelhantes podem ser aplicados em alcance e velocidade Doppler, entre outras técnicas.

Figura 2.4³: Exemplo de filtragem de acompanhamento para suavizar uma série de medições de posição individuais



Fonte: Richards (2010).

As medições individuais são invariavelmente contaminadas por ruídos de medição e/ou outras fontes de erro. Uma estimativa aperfeiçoada da posição do alvo ao longo do tempo é obtida por filtros de acompanhamento, que combinam várias medições com um modelo da dinâmica do alvo para suavizar as medições. Por exemplo, a linha pontilhada na Figura 2.4 mostra a posição de um alvo que está inicialmente se afastando do radar em alguma coordenada em velocidade constante e, então, no passo 30 de tempo para de se mover. Os pequenos losangos representam medições individuais com ruído de posição, e a linha sólida mostra a posição

² O conceito de resolução descreve a capacidade de um radar para distinguir dois ou mais alvos que estão próximos, seja em alcance, ângulo ou frequência Doppler (SKOLNIK, 2008).

³ Tradução nossa: Posição (*Position*); Passo (*Time Step*); Posição medida (*Measured Position*); Trajetória estimada (*Estimated Trajectory*); Trajetória real (*Actual Trajectory*).

estimada usando um algoritmo de filtragem de acompanhamento específico (RICHARDS, 2010).

As configurações de radar ideais para busca e acompanhamento são diferentes. Conseqüentemente, essas funções às vezes são realizadas por dois radares diferentes. Isso é comum em situações em que o peso e o volume do radar não são severamente limitados, ou seja, operações terrestres. Quando o peso e o volume do radar são limitados, como nas operações aerotransportadas ou em alguns navios, essas funções devem ser executadas por radares que devem então se comprometer entre a otimização de tais funções (HENDRIX, 2002). Por exemplo, uma largura de feixe de antena ampla é desejável para o modo de busca e uma largura de feixe de antena estreita é desejável para o modo de acompanhamento, resultando em uma solução de largura de feixe de antena mediana.

Quanto às distinções básicas entre as funções de busca e acompanhamento em um Radar de Matriz Faseada Ativa (*Active Phased-Array Radar*, APAR), de acordo com Micheli (1996), o fator mais relevante é que o alcance de detecção da função de busca independe da frequência do transmissor, enquanto que a função de rastreamento melhora à medida que a frequência é aumentada. A razão para a melhoria da função de rastreamento com o aumento da frequência é que o ganho da antena é diretamente proporcional à frequência, concentrando assim mais potência sobre o alvo. Esse aumento de energia é concentrado por um período inversamente proporcional à largura de banda, resultando no aumento da energia do alvo para maiores frequências de transmissão, conforme Wolff (2021).

Para a função de busca, esse poder aumentado é coletado por um tempo proporcionalmente menor, já que o radar deve buscar mais células no mesmo tempo devido à largura de feixe mais estreita da antena. O resultado é que a energia coletada pela função de busca é constante com a frequência do transmissor (MICHELI, 1996). Desta forma, o aumento da frequência, as atenuações atmosféricas tornam-se significativas e, portanto, devem ser incluídas em qualquer consideração sobre a frequência de operação.

3 VISÃO GERAL SOBRE OS RADARES *PHASED-ARRAY*

Neste capítulo, para bem compreender os conceitos fundamentais relativos ao sistema e antenas *phased-array*, serão apresentados os elementos indispensáveis ao conhecimento sobre este tipo de radar; quais sejam, um apanhado histórico, suas características técnicas, princípio de funcionamento, possibilidades de arranjos das antenas e principais arquiteturas de matrizes.

3.1 Apanhado Histórico

O entendimento histórico sobre os radares *phased-array* fornece compreensões substanciais a respeito dessa tecnologia. Diante disso, este tópico tem por objetivo rememorar alguns breves fatos históricos a fim de situar os leitores sobre o tema e clarear diversos aspectos sobre a utilização destes radares nos dias atuais.

A transmissão em fase foi apresentada inicialmente em 1905 pelo ganhador do Prêmio Nobel de Física Karl Ferdinand Braun, que demonstrou uma transmissão aprimorada de ondas de rádio em uma única direção, conforme relata Mailloux (2017). Posteriormente, foi adaptado para a radioastronomia, levando o Prêmio Nobel de Física para Antony Hewish e Martin Ryle. Na mesma época, após o desenvolvimento de vários grandes conjuntos de fases na Universidade de Cambridge, esse projeto começou a ser estudado para fins militares (VISSER, 2005).

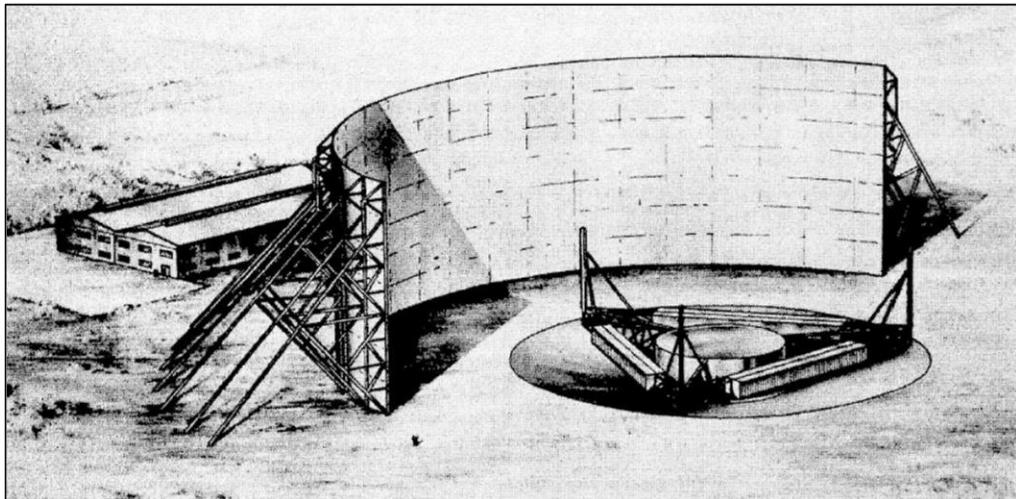
As primeiras antenas com tecnologia ESA em radares tiveram seus primeiros registros durante a Segunda Guerra Mundial; obtinham uma baixa precisão e um sistema de detecção ineficiente, sendo assim, pouco utilizados. Em 1939, novas tecnologias foram desenvolvidas pelos ingleses com foco nos sistemas de telemetria fixa e rotativa com o objetivo de detectar aviões (SKOLNIK, 2008).

Após um ano, em 1940, no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT), cientistas americanos desenvolveram a primeira

válvula Magnetron⁴; a partir desse engenho, conseguiram criar frequências da ordem de 3 gigahertz e, conseqüentemente, radares pequenos o suficiente para equipar suas aeronaves; enorme salto tecnológico para a época.

Uma iniciativa na década de 1950 implementou um rápido faseamento eletrônico dos elementos individuais da antena do conjunto para orientar o feixe do radar com a flexibilidade e velocidade da eletrônica, em vez de uma direção mecânica muito mais lenta e menos flexível (VISSER, 2005). A partir de então, a teoria desse tipo de antena foi estudada de uma forma mais aprofundada tanto na antiga União Soviética quanto nos Estados Unidos. No entanto, ainda nos dias atuais, buscam-se métodos que explorem ao máximo suas características, assim como equipamentos que diminuam o seu custo (SKOLNIK, 2008).

Figura 3.1: Proposta de radar de matriz de fase híbrida da década de 1950 que combinava configurações de matriz de antenas escaneadas mecanicamente e eletronicamente



Fonte: Fenn *et al.* (2000).

A proposta da Figura 3.1 apresentava um refletor receptor cilíndrico de 43 metros de altura por 190 metros de comprimento. Este conceito de matriz híbrida tinha grande potência, grande abertura de recepção e uma rápida capacidade de varredura grande angular (FENN *et al.*, 2000). Ele foi configurado para pesquisar grandes volumes de espaço, de modo que uma

⁴ Válvula com um tubo de vácuo de alta potência que gera microondas usando a interação de um fluxo de elétrons com um campo magnético enquanto passa por uma série de cavidades de metal abertas (ressonadores de cavidade). Em um conjunto de radar, o guia de ondas do magnetron é conectado a uma antena. O magnetron é operado com pulsos muito curtos de voltagem aplicada, resultando em um pulso curto de energia de micro-ondas de alta potência sendo irradiada. Como em todos os sistemas de radar primários, a radiação refletida de um alvo é analisada para produzir um mapa de radar em uma tela (VAN KEUREN, 1997).

instalação pudesse detectar todos os satélites que passassem pelos Estados Unidos, detentores do protótipo, até uma altitude orbital de três mil milhas náuticas.

Muitas empresas, laboratórios governamentais e instituições acadêmicas estiveram envolvidas no desenvolvimento de métodos para o direcionamento eletrônico do feixe radar. Na verdade, essa área de pesquisa nas décadas de 1950 e 1960 poderia ser caracterizada como “mil maneiras de orientar um feixe de radar” de acordo com Fenn *et al.* (2000), devido a enorme variação de projetos desenvolvidos nesse período.

Muitos céticos, na época, acreditavam que uma solução viável e acessível de um radar com milhares de elementos em um *array*, todos trabalhando em coerência de fase fortemente orquestrada, demoraria muito para se tornar realidade (FENN *et al.*, 2000). Em retrospecto, tanto os entusiastas quanto os céticos estavam certos. O sonho do movimento de feixe eletrônico era realizável, mas levou muito tempo para alcançá-lo e ainda não foi totalmente atingido, tendo em vista a busca incessante pela redução de custos dos radares *phased-array*; considerado extremamente caro e complexo até a presente data.

No ano de 1983, deu-se início a operação dos radares americanos de modo passivo tridimensional (3D) de estado sólido com varredura eletrônica (*Passive Electronically Scanned Array*, PESA) da classe “SPY-1”, principal família de radares *phased-array* no ambiente de Guerra Eletrônica; marco na linha do tempo dessa tecnologia.

O programa de circuitos integrados monolíticos de micro-ondas e ondas milimétricas (MIMIC) da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa dos Estados Unidos (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA), que começou em 1988 e durou até 1995, estabeleceu processos de fabricação robustos e controláveis para chips de circuito integrado de arseneto de gálio (GaAs), pacotes de cerâmica multichip, dispositivos precisos auxiliados por computador e ferramentas de modelagem de circuitos, técnicas de teste automatizado e métodos avançados de fabricação (COHEN, 2012).

De acordo com Cohen (1995), o programa DARPA *High Density Microwave Packaging*, que funcionou de 1993 a 1996, focou em técnicas de empacotamento de alta densidade para aeronaves de próxima geração e radares de *phased-array* baseados no espaço, onde arranjos conformados finos são necessários. O programa DARPA *Microwave and Analog*

Front End Technology (MAFET), que começou em 1995 e terminou em 1999, desenvolveu ferramentas de design e modelos para suportar a prototipagem virtual de módulos de montagem multichip de micro-ondas e de ondas milimétricas. O objetivo do esforço do MAFET era substituir a metodologia de projeto-construção-teste por uma baseada em simulação para obter uma redução significativa no tempo de ciclo de projeto (BARTON, 1998). Esses três programas foram os principais responsáveis por permitir a inserção de matrizes em fases ativas em sistemas militares em campo a partir da década de 1990.

A introdução do radar de busca combinada RAN-20S, de produção italiana, empregado nas Fragatas Classe “Niterói”, principal classe de navios-escolta da MB, se deu na década de 1990 com a tecnologia PESA, contribuindo ainda mais para o avanço dos meios da Força de Superfície da Esquadra brasileira (GALANTE; POGGIO, 2013).

Em 2003, segundo Smits e Van Genderen (2003), fruto de uma parceria entre os governos da Dinamarca, Alemanha e Holanda com a empresa THALES NEDERLAND, foi desenvolvido o APAR, primeiro radar naval criado no mundo derivado da tecnologia de Radar de Varredura Eletrônica Ativa (*Active Phased Array Radar*, AESA). A primeira versão do APAR foi instalada em 4 Fragatas Classe *De Zeven Provinciën* da Marinha Holandesa, em 3 Fragatas Classe *Sachsen* da Marinha Alemã e 3 Navios-Patrolha da Classe *Iver Huitfeldt* da Marinha Dinamarquesa (THALES, 2019).

Logo em seguida, no ano de 2004, os pesquisadores do Instituto de Tecnologia da Califórnia (California Institute of Technology, Caltech), demonstraram o primeiro receptor de *phased-array* integrado baseado em silício a 24 gigahertz com 8 elementos (HASHEMI; GUAN; HAJIMIRI, 2004). Em seguida, apresentaram também um transmissor *phased-array* CMOS⁵ 24 gigahertz (NATARAJAN; KOMIJANI; HAJIMIRI, 2005) e um transceptor *phased-array* totalmente integrado de 77 gigahertz com antenas integradas (BABAKHANI *et al.*, 2006). Em 2007, os pesquisadores da DARPA anunciaram uma antena de radar *phased-array* de 16 elementos que também foi integrada com todos os circuitos necessários em um único *chip* de silício com operação em 30-50 gigahertz (NATARJAN *et al.*, 2006). Feitos que criaram os

⁵ *Complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS), também sendo nomeado como *complementary-symmetry metal-oxide-semiconductor* (COS-MOS), em português metal-óxido-semicondutor complementar e metal-óxido-semicondutor de simetria complementar. É definido como um tipo de processo de fabricação que utiliza silício para construção de transistores para o desempenho de funções lógicas (ALLEN; HOLBERG, 2011).

alicerces para os mais recentes avanços tecnológicos na área de antenas faseadas, bem como revolucionaram as mais modernas arquiteturas de radares *phased-array* atualmente utilizadas.

Em 2018, foi incorporado à Marinha do Brasil o Navio Aeródromo Multipropósito (NAM) “Atlântico”. Adquirido junto à Marinha Real Britânica, o navio possui como principal sensor de combate o sofisticado radar ativo Artisan 3D (*Type 997*), com alcance de 200 quilômetros e capacidade de acompanhamento de até 900 alvos simultaneamente; mesmo modelo utilizado pelos principais meios navais britânicos. Primeira embarcação do Brasil equipada com um radar 3D ativo. Esse fato, que será melhor abordado no capítulo 5, representa um marco histórico para o Poder Naval.

Percorrendo a história, cabe evidenciar que vários sistemas e técnicas baseadas em conjuntos de elementos transmissores / receptores capazes de produzir deslocamentos de fase foram desenvolvidos e aprimorados. Faz-se mister salientar que os primeiros saltos tecnológicos que foram sendo integrados e, conseqüentemente, melhoraram a tecnologia radar anteriormente existente ocorreram em anos próximos as guerras mundiais, confirmando a supremacia dos países que estavam na vanguarda do desenvolvimento tecnológico e científico.

Hoje, eles são muito mais sofisticados, numerosos e abrangentes. De acordo com Coats (2017), nas últimas duas décadas, as tecnologias de radares *phased-array* foram predominantemente implantados por um grupo seleto de países desenvolvidos, em particular os Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha, Rússia, Japão, França e Holanda. Entretanto, também houve um uso mais amplo dessa ferramenta pelas forças armadas de outras nações, devido à globalização que acelerou a difusão da tecnologia, bem como à disponibilidade e aos requisitos operacionais (em particular a busca por capacidades assimétricas).

Em linhas gerais, os radares *phased-array* e tecnologias derivadas estão se tornando cada vez mais parcela dos arsenais militares em todo o mundo. Outrossim, o sucesso das aplicações incentiva a proliferação deste tipo de radar; não só pelo processo de importação, mas também pela busca da capacidade de fabricação (KOPP, 2012). O que corrobora com a visão de Schwartz (2015), o qual relata que, atualmente, esses sensores não estão apenas ao alcance das grandes potências; muito pelo contrário, o número de Estados em posse desses radares vem crescendo com o passar do tempo.

3.2 Características Gerais dos Radares *Phased-Array*

O presente estudo é motivado pela crescente evolução nas aplicações em radares *phased-array* a partir de resultados em avanços nos campos de microondas, processamento digital de sinais, circuitos integrados, entre outros. De acordo com Micheli (1996), a principal diferença desse tipo de radar para os demais é a presença das antenas que originam o seu nome, as quais são capazes de direcionar o feixe eletronicamente no espaço; de forma a proporcionar uma maior flexibilidade, bem como tornar o sistema muito mais versátil; sendo então capaz de realizar uma melhor gestão da energia no ambiente, otimizando as funções de busca e acompanhamento.

Os arranjos em fases talvez tenham se tornado o tipo de antena mais comumente usado nos modernos sistemas de radares militares. As razões para isso são abundantes. Primeiro, os *arrays* em fase fornecem alta confiabilidade, alta largura de banda e excelente controle de lóbulo lateral. Em segundo lugar, há certas aplicações para os quais são qualificados de maneira exclusiva:

Os *arrays* em fase são ideais para aplicativos furtivos porque não têm partes móveis; são excelentes para aplicações aerotransportadas porque podem direcionar eletronicamente para ângulos extremos enquanto mantêm um perfil baixo, minimizando assim o arrasto da aeronave; e são ideais para sistemas de radar de solo, que em alguns casos são muito grandes para rotação mecânica, quanto mais para varredura rápida de feixe (BIL; HOLPP, 2016, tradução nossa).

Por fim, os arranjos em fase têm notável agilidade de feixe eletrônico; assim permite que várias funções sejam realizadas quase simultaneamente por um único radar, aplicação fundamental para o uso naval.

É indiscutível que toda tecnologia também tem seus pontos negativos. Diante disso, pode-se destacar a faixa de varredura de cada *array* limitada por 120 graus em azimute e elevação (nulificada durante o uso de tecnologias de radares 3D); deformação do padrão da antena durante o direcionamento do feixe; baixa agilidade de frequência; uma complexa estrutura computacional; além do elevado custo, comentado a seguir.

Aos olhos de hoje, a maior desvantagem das antenas *phased-array* continua sendo o elevado preço (CONWAY *et al*, 2018), apesar dos trabalhos com essa tecnologia terem sido

iniciados há mais de cinco décadas. Os arranjos em fases custam muitas vezes mais do que um refletor tradicional com o mesmo ganho; no entanto, essa lacuna vem diminuindo. Conforme explicam Castillo-Rubio e Pascual (2019), o custo do *phased-array* tende a reduzir sobremaneira quando tecnologias como os sistemas microeletromecânicos (MEMs) e os circuitos mistos de silício-germânio (SiGe) substituírem alguns dos componentes mais caros dos arranjos faseados. No entanto, a funcionalidade aumentada do *phased-array* muitas vezes justifica esse valor adicional, tanto é que a maioria das nações não medem esforços para tentar dominar e aperfeiçoar cada vez mais essa tecnologia. A Figura 3.2 é um exemplo de um *phased-array* moderno, neste caso, no nariz de uma aeronave de caça.

Figura 3.2: AN / APG-81 (AESA)



Fonte: Cooley (2015).

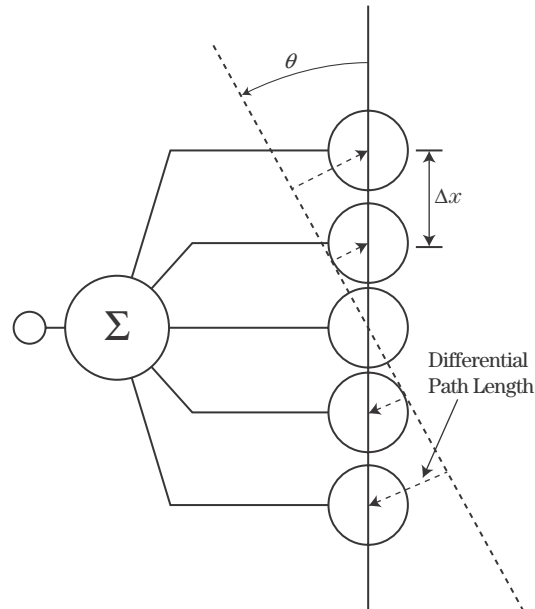
3.2.1 Antenas *Phased-Array* e seu Princípio de Funcionamento

Uma antena *phased-array* é, na verdade, um conjunto de antenas, geralmente idênticas e uniformemente espaçadas, cujos radiadores individuais podem ser alimentados com diferentes deslocamentos de fase; basicamente, refere-se a um sistema que é projetado de modo que o efeito da combinação de seus múltiplos elementos atenda ao propósito desejado. Como resultado, o padrão comum de antena pode ser direcionado eletronicamente a partir das matrizes desses elementos de antena estacionários controlados computacionalmente de modo a apontar em direções específicas, descartando a necessidade de partes móveis.

Quanto ao princípio de funcionamento desta antena, baseia-se no efeito de interferência, ou seja, uma superposição dependente de fase de duas ou (normalmente) várias

fontes de radiação. Portanto, se dois radiadores emitem um sinal na mesma mudança de fase, uma superposição é obtida, o sinal é amplificado na direção principal e atenuado nas direções secundárias. A Figura 3.3 apresenta, como exemplo, um caso de onda plana de uma matriz linear de elementos de irradiação isotrópica de um ângulo θ em relação à normal da matriz.

Figura 3.3⁶: Onda plana com ângulo θ que se cruza com uma matriz de cinco elementos



Fonte: Hansen (2009).

No exemplo, o espaçamento entre elementos é Δx , então o comprimento do caminho diferencial que a onda plana deve propagar entre um elemento e o próximo é $\Delta x \cdot \sin \theta$. Este comprimento de caminho diferencial resulta em uma mudança de fase relativa entre os sinais em cada elemento. A resposta de tensão da matriz à onda plana é a soma das respostas de tensão de cada elemento (HANSEN, 2009).

Qualquer tipo de antena pode ser usada como um radiador de uma antena *phased-array*. Significativamente, os radiadores individuais devem ser controlados com um deslocamento de fase variável e, portanto, a direção principal da radiação pode ser alterada continuamente. Para alcançar alta diretividade, muitos radiadores são usados no campo da antena. A antena do RRP-117, por exemplo, é composta por 1584 radiadores cujo sinal recebido ainda é combinado de forma analógica ao padrão da antena. Conjuntos de radares

⁶ Tradução nossa: Comprimento do caminho diferencial (*Differential Path Length*).

multifuncionais mais modernos, por outro lado, usam a formação de feixe digital durante a recepção (WOLFF, 2021).

Figura 3.4: Antena do radar 3D de defesa aérea alemão RRP-117



Fonte: Wolff (2021).

Em relação as antenas de direção mecânica, normalmente representado por uma única antena rotativa que carece de um movimento em 360 graus, o escaneamento eletrônico é muito mais flexível e requer menos manutenção (WOLFF, 2021). Com isso, é possível observar que em um cenário de múltiplas ameaças aéreas, um radar com antena ESA se mostraria muito mais eficaz do que um radar com movimento mecânico devido a sua capacidade de mudar instantaneamente de alvo, o que não é tangível em radares convencionais (CASTRO, 2004). Enquanto radares convencionais podem levar segundos para apontar para uma determinada direção, os *phased-array* levam milionésimos de segundo.

Outro aspecto relevante sobre a diferença entre radares com antenas de direção eletrônica e varredura mecânica, conforme afirmam Castro (2004) e Hansen (2009), diz respeito a eliminação dos complexos mecanismos dos radares de varredura mecânica; o que reduz sobremaneira gastos com manutenção e controle de avarias, como problemas no servo motor da antena. Com efeito, falhas em simples componentes estruturais de uma varredura mecânica podem acarretar a condição de inoperabilidade do sistema, enquanto a falha ou destruição de

alguns módulos de uma antena *phased-array* não são suficientes para comprometer o funcionamento em sua totalidade, devido a natureza descentralizada de operação individual de cada antena.

Consoante à necessidade de aplicação, faz-se necessário uma análise de projeto para a determinação das características construtivas de uma antena *phased-array*. Um requisito fundamental é a geometria da matriz de antenas, que consiste do número de elementos que irá compô-la, da distância física entre cada um deles e da forma como estarão dispostas entre si. No tocante aos parâmetros definidos via *software*, é possível manipular adequadamente o posicionamento do feixe principal por meio do controle da amplitude e fase de cada elemento emissor da matriz, individualmente (POMPEO; DO VAL; MENDES, 2012). O que corrobora com o entendimento de Visser (2005, tradução nossa) sobre o assunto:

A relação entre a diferença de fase e a diretividade do sistema é tal que pode-se alterar a direção de máxima irradiação alterando-se a diferença de fase entre os sinais irradiados por cada elemento do arranjo, ou *array*. A manipulação dessa diferença de fase pode ser realizada pela alteração do espaçamento entre os elementos ou, de forma muito mais conveniente e factível, através da inserção de elementos deslocadores de fase independentes para cada irradiador.

3.2.2 Deslocadores de Fase (*Phase Shifters*)

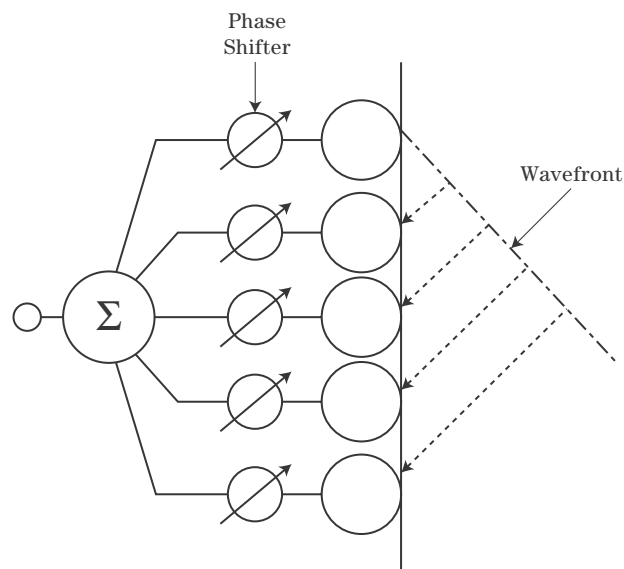
Se um deslocador de fase for instalado atrás de cada um dos elementos de radiação, conforme mostrado na Figura 3.5, o *array* pode ser reestilizado rapidamente; simplesmente ajustando as configurações do deslocador de fase. A fase através de cada deslocador será definida para o ângulo de varredura desejado. Essa capacidade de varredura eletrônica dinâmica de matrizes em fases os torna muito atraentes para as aplicações de radar modernas. O feixe da antena pode ser movido rapidamente em um padrão arbitrário.

A tecnologia *phase-shifter* tem sido uma área de pesquisa e discussão energética nos últimos 60 anos. Neste afã, alguns conceitos-chave foram estabelecidos, segundo Skolnik (2008), primeiramente, os deslocadores de fase não têm resolução de fase arbitrariamente fina. Esse erro é conhecido como erro de quantização de fase e é determinado pelo número de bits no deslocador de fase.

Como cada elemento da antena requer uma mudança de fase diferente, os erros na matriz muitas vezes parecem ser aleatórios. Portanto, esses erros de quantização são tipicamente

modelados como erros aleatórios e tendem a aumentar o nível dos lóbulos laterais⁷ do padrão de radiação. Conforme o número de bits de deslocamento de fase aumenta, o erro de quantização diminui e o desempenho dos lóbulos laterais da antena melhora. Além disso, de acordo com a diminuição da energia desses lóbulos, a diretividade se tornará maior.

Figura 3.5: Deslocadores de fase inseridos após os elementos de radiação para fazer a varredura eletrônica do feixe



Fonte: Hansen (2009).

Corroborando com Skolnik (2008), Hansen (2009) também aborda esse assunto e complementa que a perda de ganho real depende do tamanho da antena, forma e peso da abertura. Por outro lado, a perda de inserção através do deslocador de fase também aumentará com o número de bits. Portanto, nem sempre é benéfico usar o deslocador de fase de mais alta resolução disponível.

O segundo conceito-chave é que os deslocadores de fase não são ideais para aplicações de radar de banda larga porque o atraso de fase necessário para um feixe varrido depende da frequência (SKOLNIK, 2008).

⁷ Ocasionalmente, geralmente, pelo excesso dos valores críticos das distâncias entre os elementos transmissores de um projeto de arranjo faseado (TOSO; MAILLOUX, 2014).

3.2.3 Possibilidades de Arranjos de Antenas *Phased-Array*

Existem tantas possibilidades de design diferentes para matrizes em fase quanto dezenas de diferentes elementos de matriz radiante para escolher. Além do que, o espaçamento e o número de elementos irradiadores podem variar amplamente, dependendo dos requisitos de varredura.

Com base no tipo de aplicação radar, exige-se um certo tipo de geometria de matriz. A geometria das matrizes de antenas *phased-array* é dada pelo número de elementos que compõem o sistema, pela forma como estão distribuídos e também pela distância entre os elementos (MAILLOUX, 2017). Naturalmente, é necessário entender completamente a forma como estão dispostos, o custo e os aspectos de acoplamento mútuo⁸ de qualquer elemento irradiante, pois caracterizam limites à operação do sistema; que devem ser considerados durante o projeto. Essa forma pode ser linear, planar, circular, entre outros. Abaixo, será apresentado de forma simples os arranjos linear, planar e circular, pois são os principais e mais difundidos comercialmente.

3.2.3.1 Matriz Linear (*Linear Array*)

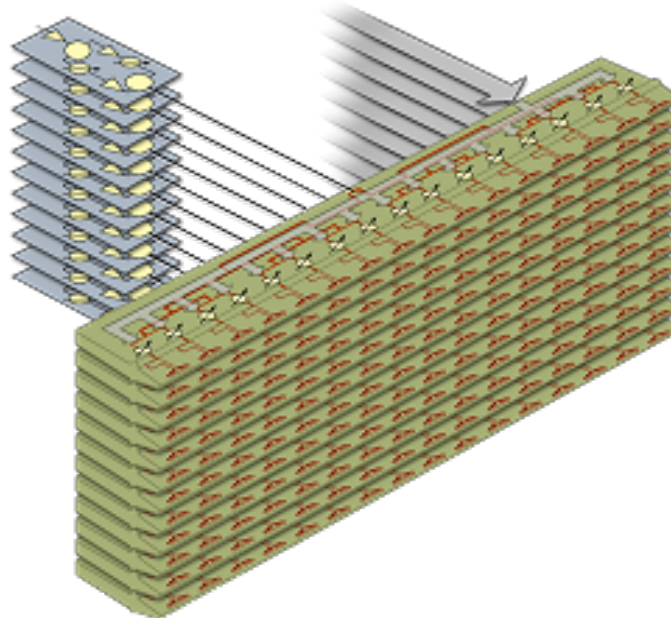
Basicamente, essas antenas *phased-array* consistem em linhas ao longo do eixo de uma matriz, que são comumente controladas por um deslocador de fase único, devido ao fato que apenas um deslocador de fase é necessário por grupo de radiadores nesta linha.

Geralmente um *array* de antena linear é composto por elementos igualmente espaçados, sendo essa grandeza de extrema importância para o projeto, pois está relacionada com o máximo ângulo de visada possível sem que tenha um pico indesejável em uma direção qualquer (SKOLNIK, 2008); e, também influencia no diagrama total reproduzido pela antena. Vários arranjos lineares dispostos verticalmente uns sobre os outros formam uma antena planar, conforme apresentado na Figura 3.6, que será abordado a seguir.

⁸ A interação entre os elementos da antena dentro do *array* resulta em uma mudança de impedância, o que, por sua vez, afeta a magnitude, fase e distribuição da corrente em outros elementos vizinhos. Em geral, o espaçamento dos elementos deve ser projetado para evitar os lóbulos laterais e reduzir os efeitos adversos do acoplamento mútuo; em manuais, recomenda-se na faixa de 0,33 e 0,5 comprimento de onda (WANG, 2002).

Como consequência do menor número de elementos e simplicidade do sistema, o custo de produção, em geral, também é menor. Por outro lado, segundo Fenn *et al.* (2000), o direcionamento do feixe só pode ser feito em apenas um único plano.

Figura 3.6: Modelo de um conjunto de matrizes lineares



Fonte: Wolff (2021).

3.2.3.2 Matriz Planar (*Planar array*)

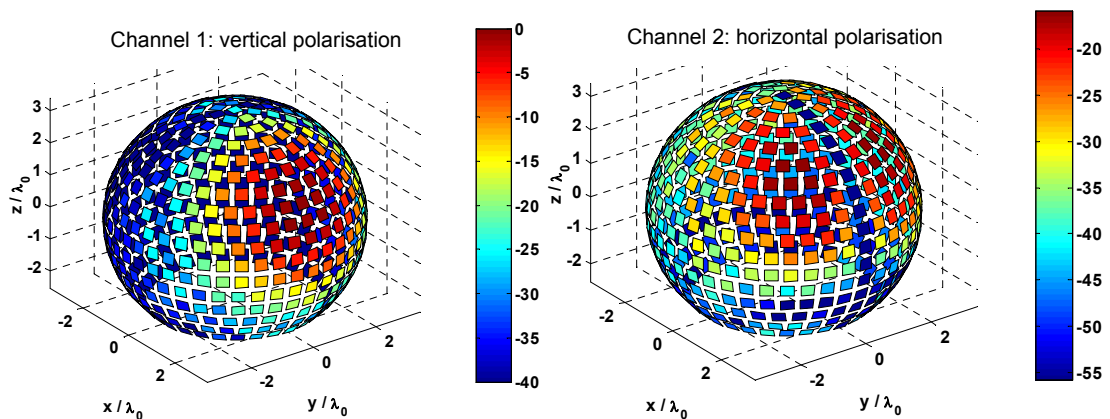
Segundo Skolnik (2008) essas antenas *phased-array* consistem em elementos únicos com um deslocador de fase por elemento. Os elementos são dispostos como uma matriz, o arranjo plano de todos os elementos forma a antena inteira. O sistema apresenta uma tecnologia e geometria mais avançada. O direcionamento do feixe pode ser feito em dois planos. Porém, depende de um grande número de elementos e seus deslocadores de fase, o que encarece o sistema.

3.2.3.3 Matriz Circular (*Circular array*)

A fim de evitar a necessidade de girar o *array* mecanicamente, as matrizes circulares surgem como uma das soluções (SKOLNIK, 2008). Desta forma, quatro faces de matrizes planas podem ser combinadas, porém o custo é quadruplicado. Sendo assim, a

construção de elementos espaçados pseudo-aleatoriamente ou conformadas (adaptação dos elementos irradiantes em uma superfície curva) podem ser eficazes. Entretanto, o aumento da complexidade de controle, desfocagem do feixe e problemas de engenharia tornam essas aplicações mais difíceis do que as matrizes lineares e planas. Além disso, para uma integração totalmente coerente na formação de feixe, as diferentes polarizações medidas nos elementos de antena orientados de forma diferente devem ser compensadas (NICKEL, 2006). Matrizes circulares e conformadas são mais comumente usadas em sistemas de comunicações militares que requerem feixe adaptativo para direcionar nulos em direção a fontes de interferência (VISSER, 2005). A Figura 3.7 mostra a distribuição de energia em ambas as polarizações de uma matriz conformada esférica.

Figura 3.7: Distribuição de energia resultante da iluminação de uma matriz conformada em uma esfera



Fonte: Nickel (2006).

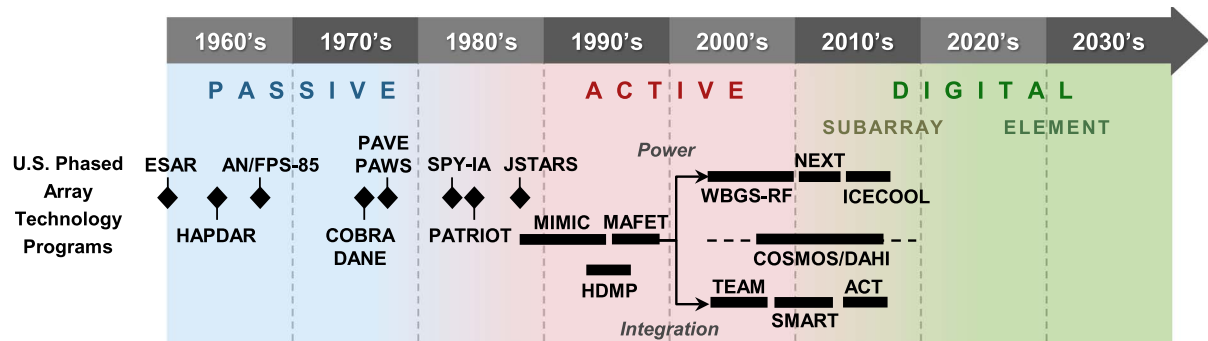
3.2.4 Arquiteturas de Matrizes

A forma como são realizados os estudos quanto aos elementos irradiantes depende em grande parte da arquitetura do sistema. Existem três categorias gerais de matrizes em fase: passivas, ativas e digitais.

Em resumo, uma matriz passiva é aquela em que a matriz é alimentada por um amplificador de transmissão de alta potência centralizado, com uma rede de combinação de potência de baixa perda e um deslocador de fase em cada elemento. Em contrapartida, uma matriz ativa é aquela em que os amplificadores de potência de transmissão, amplificadores de baixo ruído e deslocadores de fase são distribuídos por toda a matriz no nível do elemento. Por

fim, uma matriz digital é aquela em que os sinais de radiofrequência (RF) são convertidos em sinais digitais em submatrizes ou nível de elemento, com a formação do feixe sendo realizada por um processador de sinal digital (HERD; CONWAY, 2015).

Figura 3.8: Linha do tempo do desenvolvimento de programas americanos com tecnologia *phased-array*



Fonte: Adaptado de Herd e Conway (2015).

De acordo com a linha do tempo da Figura 3.8, pode-se ver a evolução da tecnologia *phased-array* e suas tendências para os próximos anos. Esta seção descreverá tais arquiteturas de *array* no projeto de antenas.

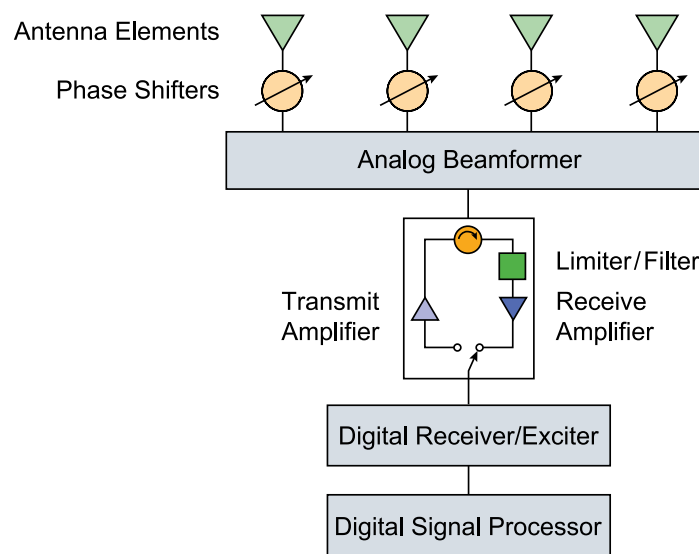
3.2.4.1 Arquitetura de Matriz Passiva (*Passive Array*)

Essa arquitetura, constituinte dos radares PESA, são uma evolução natural das antenas parabólica; que possuem como amplificador de potência (*Power Amplifier*, PA) um único transmissor centralizado que divide e conduz a energia gerada igualmente por uma rede de elementos e um amplificador de baixo ruído (*Low Noise Amplifier*, LNA) para definir a figura de ruído após todos os elementos do array terem sido combinados (RICHARDS, 2010). Além disso, todos os elementos da antena são ligados a esse único transmissor de alta potência, como uma *Traveling Wave Tube* (TWT) ou válvula *klystron*. Essa arquitetura é comumente referida como um *phased-array* passivo porque não há amplificação no elemento radiante individual.

Em termos latos, o principal benefício do *array* passivo é o custo, traduzido por uma composição mais simples. Desta forma, radares PESA, devido a essa característica construtiva, são capazes de emitir apenas um único feixe de ondas eletromagnéticas em uma

única frequência de cada vez (AGRAWAL *et al.*, 2001). Na Figura 3.9 pode-se ver uma arquitetura desse tipo.

Figura 3.9: A matriz passiva usa um PA para conduzir toda a matriz e um LNA para definir a figura de ruído



Fonte: Mailloux (2017).

As arquiteturas de *phased-array* passivas são usadas em uma série de sistemas significativos de radares militares, incluindo o radar de *phased-array* Aegis de banda S desenvolvido para a Marinha dos EUA pela RCA, o radar Patriot de banda C desenvolvido para o Exército dos EUA pela Raytheon, e o X-band J-STARS desenvolvido para a Força Aérea dos EUA pela Grumman (FENN *et al.*, 2000).

Existem, no entanto, muitas armadilhas neste projeto que levaram a um declínio em seu uso. A arquitetura passiva requer que todos os componentes do *array* lidem com alta potência, portanto, um controle menor em amplificação e atenuação, além da centralização dos componentes (SABATINI; TARANTINO, 1994). Dependendo da frequência e do tamanho da matriz, pode haver uma perda considerável na rede combinada que reduzirá a sensibilidade do radar. Por último, as unidades de atraso de tempo (*Time Delay Unit*, TDU), são difíceis de implementar nesta arquitetura porque a matriz não pode ser convenientemente dividida em submatrizes (assunto que será abordado na seção 3.2.4.3); portanto, os *arrays* passivos não são adequados para aplicações de banda larga. Conforme Herd e Conway (2015), esses fatores

levaram a um conjunto de investimentos sustentados pela DARPA no final dos anos 1980 e 1990 para desenvolver a tecnologia ativa de *phased-array*.

3.2.4.2 Arquitetura de Matriz Ativa (*Active Array*)

Essa arquitetura, constituinte dos radares AESA e dos radares navais APAR, diferentemente da tecnologia passiva, segundo Edwards (2006) e Kopp (2007), possui um módulo com transmissor, deslocador de fase, PA e LNA em cada elemento de radiação, garantindo assim uma menor perda de potência e capacidade de criar distribuições em amplitude. Conforme mostrado na Figura 3.10, a arquitetura ativa tem várias vantagens sobre a passiva.

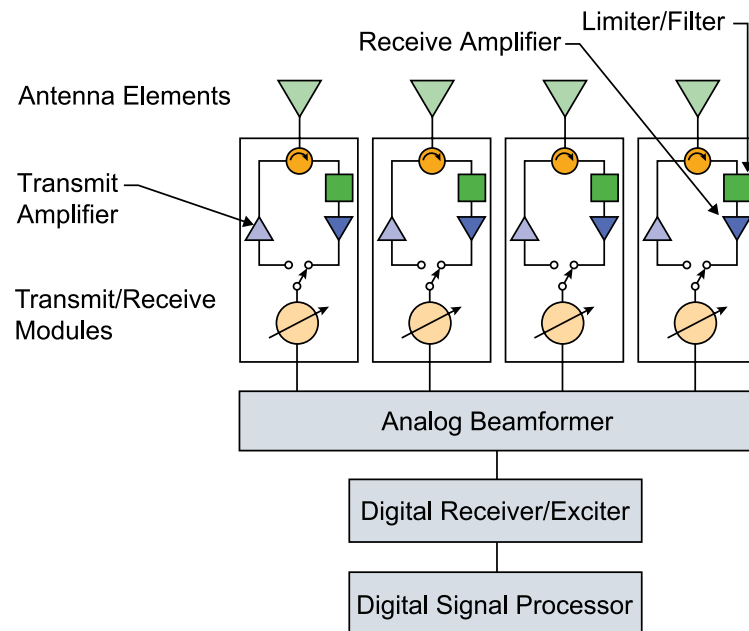
Como nos radares AESA a arquitetura não se baseia em um único transmissor de potência, estes possuem como principal vantagem a habilidade de irradiar múltiplos feixes de ondas em frequências diferentes simultaneamente, pois cada módulo Transmissor-Receptor (T/R) é capaz de gerar e transmitir o seu próprio sinal de forma independente dos demais. Assim, são produzidos múltiplos feixes que podem acompanhar uma grande gama de alvos ou realizar múltiplas tarefas ao mesmo tempo (MANTHRI, 2019). Com isso, as perdas de transmissão entre o PA e o radiador e as perdas de recepção entre o radiador e o LNA são minimizadas (MAILLOUX, 2017).

Em adição, a arquitetura AESA fornece flexibilidade adicional de formação de feixe, uma vez que a amplitude e a fase de cada elemento podem ser controladas dinamicamente. Isso permite que o afunilamento da amplitude de abertura seja ajustado de pulso a pulso ou de transmissão para recepção, enquanto em uma arquitetura passiva o afunilamento da amplitude de abertura é projetado na rede de formação de feixe da matriz (RICHARDS, 2010).

De forma complementar, os AESAs podem operar mesmo quando uma pequena porcentagem dos módulos T/R falha, sendo tolerável uma perda de até 10% dos amplificadores; portanto, eles degradam de forma mais suave do que a arquitetura passiva (HERD; CONWAY, 2015). As desvantagens do AESA são o custo, a necessidade de resfriar toda a abertura para

remover o calor gerado pelos PAs (uso de mais dissipadores) e a necessidade de calibração em campo (SABATINI; TARANTINO, 1994).

Figura 3.10: Um AESA possui um PA e um LNA atrás de cada radiador. Esses dispositivos são geralmente embalados em um módulo T/R



Fonte: Mailloux (2017).

Quanto ao resfriamento, os custos podem ser amenizados para algumas aplicações pelo surgimento do conceito de densidade de baixa potência (*Low Power Density*, LPD), no qual o módulo T/R é reduzido a ponto de se tornar um único circuito integrado monolítico de micro-ondas (*Microwave Monolithic Integrated Circuit*, MMIC). Comeau *et al.* (2007) aponta em seu estudo sobre receptores para radares *phased-array* que o silício-germânio é uma tecnologia de semicondutor ideal para aplicações LPD porque é barata, de baixa potência e performa um excelente desempenho de RF em frequências de radar típicas.

No âmbito da Guerra Eletrônica (GE), faz-se mister salientar que um APAR é notável quando comparado aos PESA em relação as técnicas de jamming. Técnica essa que trabalha com eficácia desde que o radar alvo não seja apto para alterar sua frequência de operação com facilidade, isto é, para que o ataque seja bem sucedido é necessário determinar a frequência na qual o oponente está emitindo, para, assim, o atacante transmitir um sinal nesta mesma frequência.

Neste diapasão, os radares AESA apresentam também a técnica conhecida como *chirping*, a medida em que conseguem realizar a mudança de frequência ao longo de ampla faixa do EM (WITAN WORLD, 2020). Conforme Word Disk (2017), um radar AESA possui a capacidade de utilizar somente o modo de recepção, de forma a usar os sinais obtidos de *jamming* inimigo com o objetivo de encontrar sua marcação, recurso que exigiria um receptor exclusivo para tal em radares mais antigos.

Devido a alta agilidade em frequência, bem como a capacidade de variar a FRP e a largura de pulso (LP), técnicas de medidas de apoio a guerra eletrônica (MAGE), não demonstram assertividade contra esse tipo de radar. Com efeito, torna-se um radar muito furtivo, com pouca necessidade de adotar condições de silêncio eletrônico (CONSET) em um Teatro de Operações (TO), o que facilita sobremaneira a compilação do quadro tático e sua competência bélica (BLILEY TECHNOLOGIES, 2017).

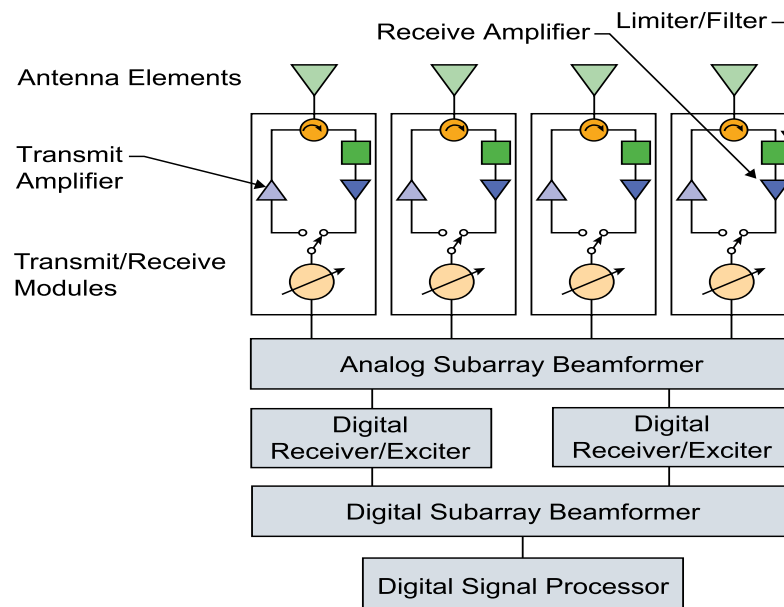
Outra diferença entre os radares PESA e AESA, é a maior confiabilidade e disponibilidade da tecnologia ativa, já que são menos suspensos a falhas críticas, por conta da sua descentralização de funcionamento dos elementos. Sendo assim, um APAR, conforme Zhang *et al.* (2017), tem seu projeto baseado no longo período de tempo em que pode trabalhar sem interrupções.

3.2.4.3 Arquitetura em Submatrizes Digitais (*Digital Subarrays*)

Subarrays são blocos de construção pequenos e repetíveis que podem ser produzidos em massa e combinados para formar o *array* completo. Em linhas gerais, o deslocamento de fase é aplicado ao elemento de radiação e a amplificação é aplicada a um agrupamento de elementos denominado Submatriz (NICKEL, 2006). A formação de feixes pode ser realizada de forma analógica por uma rede combinadora ou digitalmente após a conversão analógico-digital (AD) dos sinais. Para estabilidade e precisão, é preferível uma formação de feixe digital. Para uma antena de alto ganho com milhares de elementos, a conversão AD de todas as saídas de elementos pode ser proibitiva em relação ao custo (NICKEL, 2006). Soluções econômicas podem ser obtidas por *subarraying*. A primeira soma analógica das saídas do elemento é realizada após a mudança de fase, então o número reduzido de canais é convertido em AD.

A arquitetura de *subarray* abre oportunidades adicionais quando um receptor digital é colocado atrás de cada *subarray* ou grupo de *subarrays*. Uma vez que as saídas do *subarray* são digitalizadas, elas podem ser ponderadas e combinadas no computador digital para formar, em princípio, um número ilimitado de feixes de deslocamento simultâneos sem afetar os recursos do radar ou a linha do tempo (RICHARDS, 2010). Na figura abaixo pode-se ver a formação de feixe com *subarrays* digitais.

Figura 3.11: Formação de feixe com *subarrays* digitais



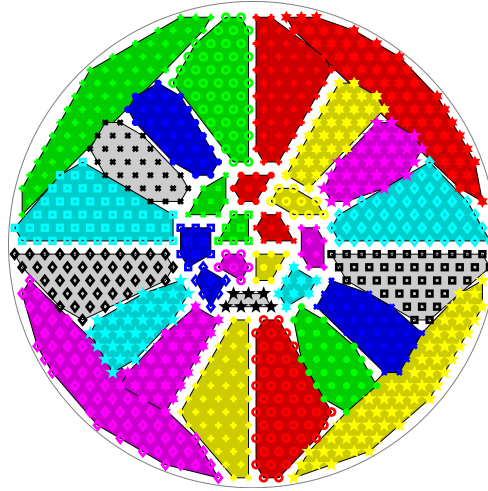
Fonte: Mailloux (2017).

A arquitetura de *subarray* abre oportunidades adicionais quando um receptor digital é colocado atrás de cada *subarray* ou grupo de *subarrays*. Uma vez que as saídas do *subarray* são digitalizadas, elas podem ser ponderadas e combinadas no computador digital para formar, em princípio, um número ilimitado de feixes de deslocamento simultâneos sem afetar os recursos do radar ou a linha do tempo (RICHARDS, 2010).

Assim como as matrizes com formação de feixes analógico, os *Subarrays* digitais também apresentam interferências por lóbulos laterais. Contudo, esses lóbulos são menores e podem ser evitados a partir do preenchimento de um *array* já completo, com elementos em espaçamentos irregulares, ilustrado na Figura 3.12, onde é mostrado uma matriz genérica com

902 elementos em uma grade triangular em espaçamento de meio comprimento de onda configurada em 32 submatrizes irregulares (NICKEL, 2006).

Figura 3.12: 2D Array com 902 elementos agrupados em 32 submatrizes



Fonte: Nickel (2006).

Subarrays digitais contíguos de tamanho aleatório também podem ser usados para fornecer agrupamentos de feixes digitais em um setor de ângulo limitado; diversos estudos e análises foram feitas para comprovar esse argumento, destacam-se Groger, Sander e Wirth (1990) e Goffer, Kam e Herczfeld (1994). Todas essas arquiteturas de *subarray* digital fornecem graus adaptativos de liberdade que podem ser usados para formar padrões nulos e implementar técnicas sofisticadas de processamento espacial. Nos casos em que o custo é uma consideração importante e múltiplos feixes simultâneos são necessários em um setor de ângulo limitado, a arquitetura de *subarray* digital fornece uma solução atraente (HERD; DUFFY, 2011).

Diante do exposto, pode-se observar que a arquitetura do *subarray* torna-se um híbrido das arquiteturas passiva e ativa. O retardo de tempo é frequentemente implementado no nível do *subarray* quando o *array* se destina ao uso em banda larga. O retardo de tempo pode ser implementado com TDUs analógicos ou implementado digitalmente se o sinal de recepção for digitalizado no *subarray*. Além disso, Herd e Conway (2015) destacam que a arquitetura de *subarray* tornou-se um método conveniente para implementar muitas técnicas avançadas, como formação de feixe digital e processamento de sinal de *array*.

4 METODOLOGIA

Nesse item foi dissertado o processo metodológico empregado neste trabalho. Para tal, foram definidas as classificações da pesquisa quanto aos fins e quanto aos meios, além de expor como se deu o colhimento de dados e informações atinentes ao assunto proposto, bem como as possíveis limitações dos métodos e atividades que foram utilizados.

4.1 Classificação da Pesquisa

Dentre os diversos tipos de classificação existentes, esta pesquisa pode ser classificada como descritiva e explicativa quanto aos fins; e quanto aos meios foram utilizados dois métodos em particular: o bibliográfico e o documental. Além disso, foi utilizada uma abordagem qualitativa que permitiu lapidar e apresentar de forma coerente as diversas informações brutas coletadas.

4.1.1 Classificação Quanto aos Fins

É possível definir esta pesquisa como descritiva pois intencionou-se minuciar diversas informações relativas aos radares *phased-array*, bem como apresentar ao leitor tendências tecnológicas relativas ao tema, os principais modelos de radares com essa tecnologia tanto no exterior quanto no Brasil, dentre outras explicitações, visando atingir o objetivo geral deste trabalho e contribuir para uma resolução clara e objetiva.

Além dessa, a pesquisa pode ser classificada como explicativa, visto que por meio dela durante todo o trabalho são esclarecidos os modos de funcionamento das tecnologias abordadas e feitas correlações entre os sistemas e suas aplicabilidades.

4.1.2 Classificação Quanto aos Meios

Quanto aos meios foi empregado o método bibliográfico pois foram utilizados diversos livros e artigos em periódicos que fazem alusão ao tema proposto. Não obstante, foram

aludidos ainda artigos científicos, teses de graduação, mestrado e doutorado de faculdades estrangeiras.

Além do método bibliográfico, aplicou-se ainda o método documental dado que foram coletadas informações de alguns documentos a fim de melhor contribuir para o embasamento teórico deste trabalho, como manuais de instituições reguladoras.

4.2 Limitações do Método

Para a confecção deste trabalho, uma das principais limitações ao método encontradas foi a dificuldade de encontrar referências em língua portuguesa que abordassem o assunto, portanto, diante da ausência de literatura nacional, foi necessária uma profunda pesquisa em fontes estrangeiras que aludem ao tema proposto.

4.3 Coleta e Tratamento de Dados

Para atingir o objetivo deste trabalho foi utilizada uma abordagem qualitativa sobre os dados coletados, o que permitiu apurar e verificar todas as fontes e exprimir as informações de forma concatenada e concisa. Sabe-se que o objetivo deste trabalho visa apresentar as características e especificidades dos radares *phased-array* e suas variantes, bem como os benefícios e a importância estratégica agregada a este tipo de tecnologia para o desenvolvimento do País e do Poder Naval, e, para tal, foram utilizadas diversas referências bibliográficas e documentais, quais sejam, livros, artigos em periódicos, artigos científicos, *websites*, teses de graduação, mestrado e doutorado.

5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Valendo-se das metodologias dispostas no capítulo 4, objetiva-se aqui abordar as tendências tecnológicas promissoras atinentes ao tema e que podem levantar problemas de projeto ou soluções para alguns requisitos de sistemas deficientes. Ademais, apresentar alguns dos mais notáveis sistemas de radares com tecnologia *phased-array* no mundo, em paralelo aos utilizados pela MB, bem como elucidar suas peculiaridades; por fim, realizar uma breve exposição referente ao Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul e o atual cenário nacional no setor de Pesquisa e Desenvolvimento, correlacionado com as perspectivas da MB face ao uso dessas tecnologias.

5.1 Tendências Tecnológicas

A busca pelo aumento de desempenho e melhoria de funções existentes é algo constante no mundo da tecnologia radar e da corrida armamentista; sendo assim, as tendências tecnológicas surgem de modo a ultrapassar barreiras e encontrar formas de aperfeiçoar os sistemas existentes com soluções que garantam sempre a superioridade neste cenário competitivo, de incessante e rápida evolução. Para tal, esta seção apresentará algumas das preeminentes tendências em *phased-array* que norteiam as discussões relativas ao tema.

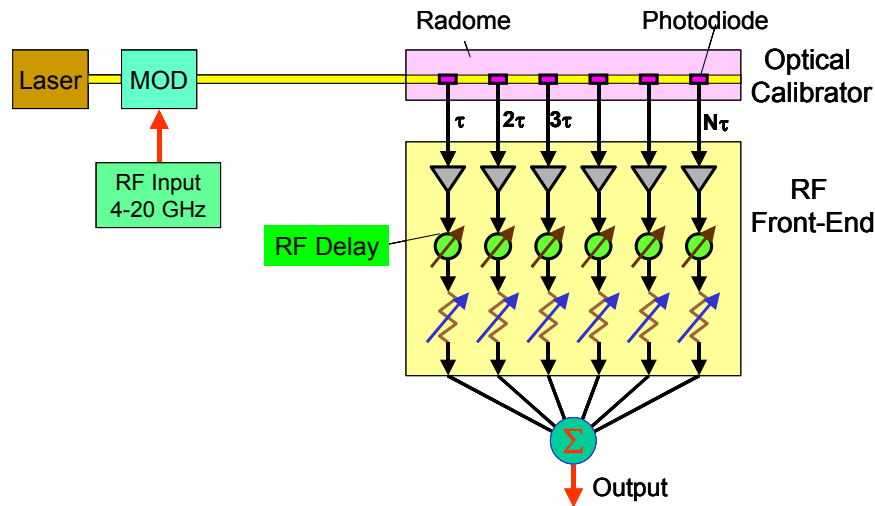
5.1.1 Fotônica e Fibras Ópticas

A evolução da tecnologia de componentes e o uso da fotônica em aplicações *phased-array*, impulsionada pelo mercado de comunicações, está tendo um grande impacto também na área militar, permitindo uma ampla exploração de fibras ópticas para aqueles sinais digitais em sistemas de defesa onde os requisitos ambientais são mais restritivos do que nas telecomunicações (PIERNO *et al.*, 2015).

Desta maneira, em Antenas AESA Multifuncionais (M-AESA), a tecnologia de transporte digital óptico de curtíssima distância oferece uma alta conformidade eletromagnética e uma taxa de bits maior que 10 gigabits por segundo; para as funções de temporização e controle e para o Sistemas de radar de banda larga baseados em Formação em Rede de Feixe

Digital (*Digital Beam Forming Networks, DBFN*). Além disso, o domínio RF analógico se beneficiou da evolução dos componentes. Com isso, o enorme potencial da fotônica pode ser explorado em subsistemas de radares, bem como de Guerra Eletrônica (CARONTI *et al.*, 2016).

Figura 5.1: Calibração de matrizes por fotônica



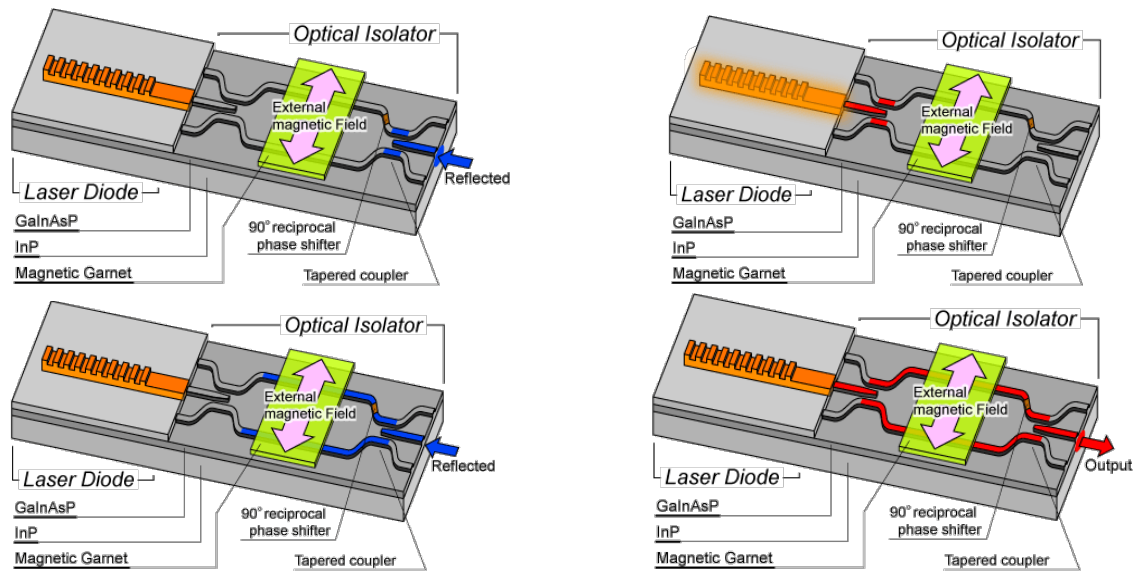
Fonte: Dorsey *et al.* (2010).

A Figura 5.1 ilustra o conceito de um sistema de calibração fotônica. A matriz de matrizes de fotodetectores é incorporada dentro do radome na frente dos módulos T/R e elementos de matriz, e a injeção de RF dirigida fonicamente é irradiada para os elementos para uma calibração rápida (DORSEY *et al.*, 2010). Não há como a eletrônica digital com condutores fazer isso.

Na guerra assimétrica, onde a linha do tempo pode ser a mercadoria mais cara, essa operação simultânea de transmissão e recepção pode eliminar o problema por completo. Isso é possível devido às excelentes propriedades de isolamento dos caminhos ópticos.

Diante do exposto, pode-se declarar que as arquiteturas acrescidas de fotônica visam se tornar uma tecnologia difundida em muitos sistemas de radar, em plataformas terrestres, navais, aerotransportadas e espaciais. O transporte de sinais de altíssima velocidade ou o colapso de muitos sinais elétricos em uma única fibra óptica já é comprovado (CARONTI *et al.*, 2016). A adoção da fotônica de microondas no radar requer uma mudança de arquitetura em toda a cadeia de transmissão e recepção para explorar totalmente as vantagens desta tecnologia.

Figura 5.2: Integrador óptico com diodo a laser



Fonte: Mizumoto & Shoji Laboratory (2019).

Conforme Cetronio *et al.* (2010), a evolução para um circuito óptico integrado baseado em plataformas de baixo custo compatíveis com silício, por exemplo, resolverá muitos problemas de robustez típicos de cabos de fibra óptica. Na Figura 5.2, a critério de visualização do princípio de funcionamento, um sinal RF é modulado na luz emitida por um laser. Na medida em que o índice de refração do guia de onda é alterado, a fase do sinal no caminho de propagação também é alterada. Após aplicação do atraso óptico, o sinal é misturado a fim de obter o sinal de RF, porém, agora com alteração de fase.

5.1.2 Arquitetura *Array* Completamente Digital

Diferente da tecnologia com *subarrays* digitais mostrada anteriormente, precursora desta, por assim dizer, a formação do feixe em uma arquitetura digital completa não é aplicada apenas no canal de recepção. Aliás, gera o sinal independente para cada elemento transmissor. Portanto, a eletrônica associada à conversão e digitalização de RF deve ser integrada ao módulo T/R. Chama-se de Digital T/R a este novo módulo que está conectado a cada um dos elementos radiantes da antena.

A comunicação digital entre as placas de controle digital através do *array* é o fator chave para gerar sincronicamente as formas de onda de transmissão e alinhar as amostras de

recepção para obter os diferentes feixes. A sincronização é, portanto, crítica para obter o máximo proveito desta arquitetura (HERD; CONWAY, 2015).

Dentre as inúmeras vantagens desta técnica, Tornazakis (2008) e Conway *et al.* (2018), ressaltam: multifuncionalidade (ilimitada formação de feixes simultâneos); escalabilidade baseada em blocos de construção (formato de matrizes facilitado); capacidade da diretividade precisa de controle de energia (aumento da furtividade a partir do uso de *subarrays*); sensibilidade aprimorada e robustez contra ECM; redução drásticas de falhas críticas, já que nenhum módulo exclusivo está localizado na antena propriamente dita (cada bloco de construção executa a mesma funcionalidade, se algum deles falhar, o resto do *array* pode manter a operação e reconfigurar dinamicamente suas configurações para minimizar a degradação); e gerenciamento otimizado de tempo; melhor manutenibilidade.

No que tange aos desafios de design e construção desta tecnologia, pode-se citar: complexa sincronização entre os elementos, especialmente quanto ao alinhamento temporal; dificuldade de dissipação de temperatura; desafio perante a integração de RF e os elementos digitais no mesmo módulo a fim de controlar o acoplamento interno.

Diante dos fatos, cabe ressaltar a enorme tendência para a adoção desta técnica devido ao rápido desenvolvimento da tecnologia, a infinda quantidade de pontos positivos e a unanimidade acadêmica quanto ao seu potencial. Na verdade, isso é apenas uma questão de tempo, o que é ratificado por Lupa (2008) e Castillo-Rubio e Pascual (2019).

5.1.3 Metamateriais

Metamateriais são materiais criados pelo homem que consistem em uma série de estruturas repetidas com um tamanho menor que um comprimento de onda. Esses materiais têm propriedades não encontradas na natureza, como um índice negativo de refração. A empresa Echodyne tem tomado a dianteira quanto ao desenvolvimento de aplicações de antenas com metamateriais para uso em radares (HOST, 2020).

Para a inserção em arquitetura de matrizes, Kundtz (2014) aponta que esta deve ser formada por várias fileiras ou alimentações de ondas viajantes, nas quais é colocada uma tampa

de metal com ranhuras. Pense nisso como um guia de ondas com fenda. A antena consiste em filas de guias de ondas ranhuradas que são alimentadas pelas extremidades. Suponha que se queira irradiar em uma direção especificada; então, apenas a partir desses slots o sinal é permitido irradiar. Os sinais dos outros slots são bloqueados (HOST, 2020).

Este método de mudança de fase resulta em uma fase aleatória e erros de amplitude. O afinamento e os erros levam a lóbulos laterais da antena de baixa qualidade (BROOKNER, 2018). Para fazer a varredura do feixe na direção perpendicular às fileiras do arranjo, slots diferentes podem ser usados em cada fileira para obter um deslocamento de fase de fileira a fileira.

Por toda resposta, esse é um novo conceito, ainda em aperfeiçoamento, em que se consegue a mudança de fase sem o uso de um deslocador de fase ativo em cada elemento. Em síntese, é um novo tipo de ESA. Os ressonadores foram originalmente desenvolvidos para criar um metamaterial de permissividade negativa. Em vez do guia de onda com vazamento coberto, o sinal pode ser propagado por um guia de onda coplanar, guia de onda de placa paralela, placa dielétrica ou guia de onda com perdas (BROOKNER, 2016).

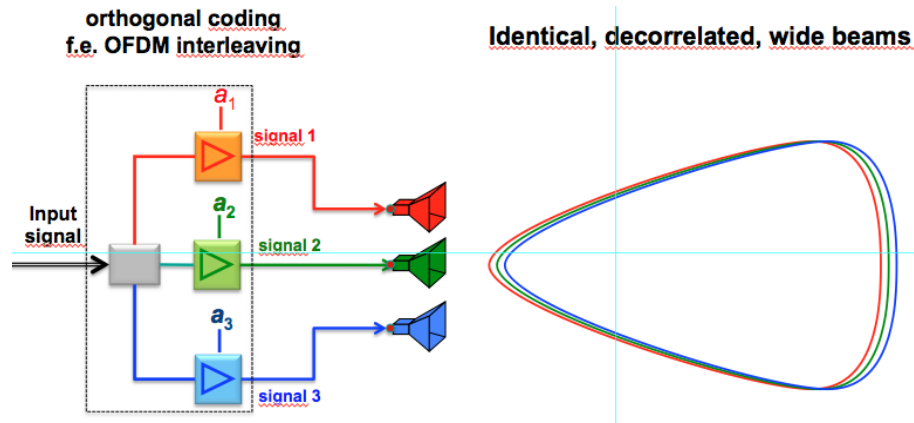
5.1.4 Radares de Múltiplas Entradas e Saídas (*Multiple-Input Multiple-Output*, MIMO)

O radar MIMO é um tipo avançado de radar *phased-array* que emprega receptores digitais e geradores de forma de onda distribuídos pela abertura. Os sinais de radar MIMO se propagam de maneira semelhante ao radar multiestático. No entanto, em vez de distribuir os elementos do radar por toda a área de vigilância, as antenas estão localizadas próximas uma a outra para obter melhor resolução espacial, resolução Doppler e faixa dinâmica (URZAIZ *et al.*, 2018).

De acordo com Brookner (2018), os sistemas de radar MIMO transmitem sinais mutuamente ortogonais de várias antenas de transmissão e essas formas de onda podem ser extraídas de cada uma das antenas de recepção por um conjunto de filtros combinados. Por exemplo, se um sistema de radar MIMO tem 3 antenas de transmissão e 4 antenas de recepção, 12 sinais podem ser extraídos do receptor devido à ortogonalidade dos sinais transmitidos. Ou

seja, um arranjo de antenas virtuais de 12 elementos é criado usando apenas 7 antenas conduzindo o processamento do sinal digital nos sinais recebidos, obtendo assim uma resolução espacial mais fina em comparação com sua contraparte do arranjo de fases. Um exemplo para a radiação de três feixes simultâneos com um radar MIMO é mostrado por Wiesbeck (2014).

Figura 5.3: Matriz de transmissão MIMO com três feixes na mesma direção



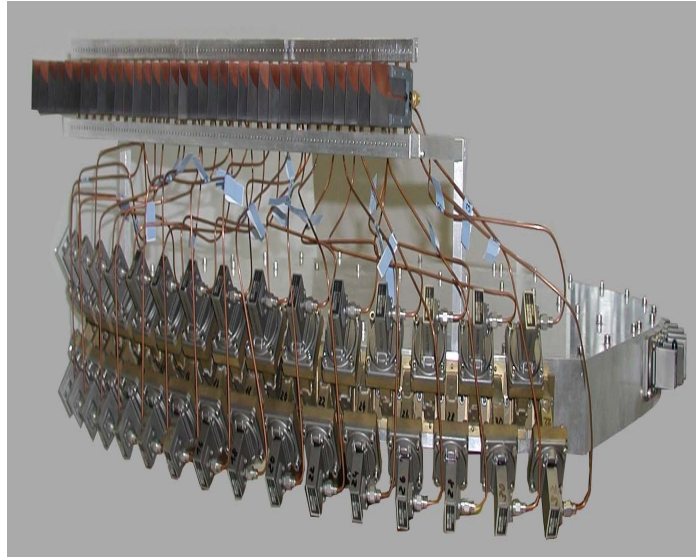
Fonte: Wiesbeck (2014).

5.1.5 Antenas Multifuncionais e de Abertura Compartilhada

Aeronaves, navios e veículos terrestres estão equipados com um número crescente de antenas para comunicação, navegação e radar em diversas faixas de frequência. O espaço limitado para essa variedade de antenas se torna cada vez mais um problema. Portanto, é altamente desejável usar a mesma antena para finalidades diferentes. Este é o conceito de antenas de abertura compartilhada. A mesma antena pode servir para diferentes tarefas, como operação de radar autônomo, radar passivo, comunicação e reconhecimento de radar (ENDER *et al.*, 2005).

No que diz respeito as tarefas de comunicação, o conceito de antena deve garantir uma visão panorâmica. Como uma alternativa à formação de feixes com módulos T/R, antenas multifuncionais que dependem de lentes eletromagnéticas são bastante relevantes. Um exemplo desta tecnologia é representado na Figura 5.4; o sistema experimental FGAN da empresa PALES usa uma lente Rotman para atingir mais de uma oitava de largura de banda (WORMS, 2004).

Figura 5.4: Antena multifuncional multifeixe de banda larga

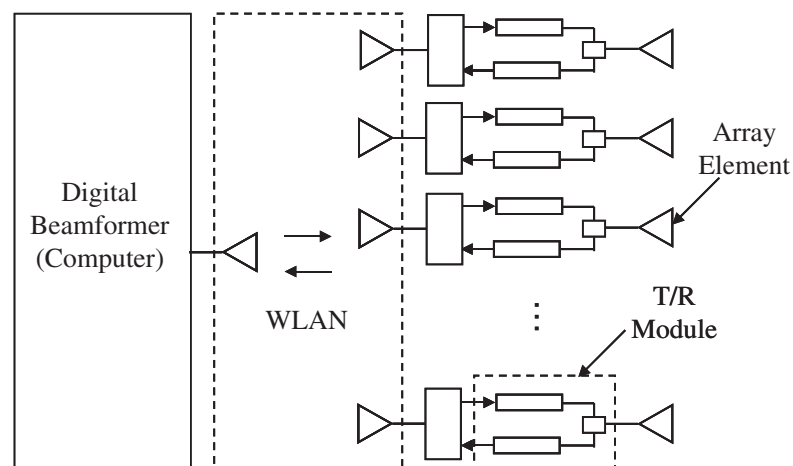


Fonte: Ender *et al.* (2005).

5.1.6 Redes de Formação de Feixes sem Fio (*Wireless*)

As matrizes distribuídas em fases têm vantagens sobre as matrizes convencionais em muitas aplicações de radar e comunicação. Vantagens adicionais são obtidas substituindo o circuito de formação de feixe de microondas por uma rede sem fio, formando assim uma matriz de sensores distribuídos em rede sem fio. Segundo Jenn *et al.* (2004), um *phased-array* é essencialmente uma rede de sensores em que o formador de feixe serve para coletar e distribuir sinais de todos os sensores. Substituir o circuito do formador de feixe por uma rede sem fio, como mostrado na Figura 5.5, produz todas as vantagens das redes sem fio convencionais.

Figura 5.5: Matriz de fase digital em rede sem fio



Fonte: Jenn *et al.* (2004).

As principais vantagens são a capacidade de reconfigurar e adicionar elementos, a adaptabilidade ao ambiente operacional e a capacidade de atualizar o desempenho do sistema por meio de *software*. As limitações de banda estreita do circuito de formação de feixe são removidas, o que potencialmente permite a operação de banda larga (BROOKNER, 2013). Múltiplas funções de radar, comunicações e GE podem ser atendidas por uma única antena com tal arquitetura.

Em aplicações militares, as características distribuídas e sem fio aumentam a capacidade de sobrevivência do sistema. O fato de os sensores poderem ser distribuídos em uma área maior, ao invés de concentrados em uma área pequena, torna o sistema menos vulnerável a um único acerto (BALL, 2003). O processador de matriz pode ser reconfigurado para compensar as falhas do elemento.

A realização de um *phased-array wireless* em forma de feixe apresenta vários desafios tecnológicos, tais como: a sincronização de fase e tempo; a rápida transferência de grandes quantidades de dados entre os elementos e o formador de feixe digital; e, velocidades de processamento de dados rápidas o suficiente para permitir a operação em tempo real. Conforme aborda Cetronio *et al.* (2010), em um ambiente dinâmico onde os elementos são distribuídos em uma superfície não rígida flexível, a posição dos elementos deve ser conhecida como estando dentro de uma fração de um comprimento de onda, a fim de compensar os erros de fase e dispersão.

Uma aplicação particular de interesse nesta pesquisa é o radar de defesa contra mísseis balísticos de longo alcance (*Ballistic Missile Defense*, BMD) embarcado em navios. Uma vantagem da abordagem *wireless* é que os elementos podem ser distribuídos nas áreas disponíveis na superfície do navio. Pode-se referir a isso como um *array* oportunista em contraste com a abordagem convencional, onde grandes áreas na superfície do navio são reservadas para a instalação do *array*. A abordagem convencional limita o tamanho da matriz e também aumenta os requisitos estruturais do navio, porque grandes áreas da superfície do navio são cortadas para inserir a antena. Além disso, a distribuição dos elementos em uma grande superfície abre possibilidades para a integração dos elementos individuais na superfície como parte da fabricação do material (JENN *et al.*, 2004).

5.1.7 Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm*, GA)

O atual cenário de GE, bem como os modernos TO exigem maneiras radicais e inovadoras de modelar e projetar radares *phased-array* multifuncionais. Dito isso, uma técnica altamente promissora nesse campo é a utilização de Algoritmos Genéticos, os quais podem ser conceituados como simulações de computador que espelham o processo de seleção natural para desenvolver soluções criativas para problemas complexos.

A capacidade de um GA de prever adequadamente o comportamento de uma antena *array* com elementos localizados aleatoriamente tem sido verificada com os resultados esperados e encorajadores através de auspiciosos projetos, como alguns apresentados nos últimos anos na Naval Postgraduate School (NPS)⁹. Em linhas gerais, é mostrado o potencial na qual os GAs têm de se tornarem uma ferramenta de projeto poderosa para antenas *phased-array* baseadas em aplicações navais.

Algoritmos genéticos são escritos em critérios semelhantes para otimizar sistemas não biológicos em um ritmo muito mais rápido e com muito menos despesas do que poderia ocorrer por tentativa e erro de fabricação ou simulação. A capacidade do computador de fazer cálculos repetitivos tediosos em alta velocidade permite que ele execute processos iterativos centenas de milhares ou milhões de vezes dentro de uma escala de tempo utilizável para a resolução de problemas. Conforme Jenn *et al.* (2004), a parte difícil muitas vezes não é o programa executado em si, mas a determinação de qual é o problema e como ele pode ser colocado em um programa em uma forma utilizável por um processador digital.

Matrizes planas de elementos regularmente espaçados, por exemplo, estão atualmente em uso devido à sua simplicidade de design e construção. No entanto, Esswein (2003) destaca que o benefício de usar um algoritmo genético é sua capacidade de se adaptar para atender a critérios complexos ao longo de uma série de várias gerações.

⁹ A NPS é uma escola pública de pós-graduação operada pela Marinha dos Estados Unidos e localizada em Monterey, Califórnia. Concede mestrados, doutorados e certificados. Fundada em 1909, a escola também oferece oportunidades de bolsa de pesquisa em nível de pós-doutorado por meio do programa de associação de pesquisa do National Academies Research Council (NPS, 2021).

GAs não estão limitados a qualquer restrição específica além da imaginação do programador e aos limites do que o nível atual de tecnologia pode traduzir em *hardware*. Por exemplo, algoritmos genéticos podem ser usados para fornecer meios taticamente realistas para a utilização de configurações de radar biestáticas, tanto em uma única plataforma quanto entre vários navios (BARTEE, 2002). O GA também pode fornecer um método para fornecer configurações otimizadas para matrizes atualmente existentes específicas para o ambiente de propagação.

Com efeito, é possível formar uma antena de matriz *phased-array* de transmissão digital a partir de componentes comerciais, bem como construir padrões de radiação compatíveis com os utilizados em radares APAR. Em adição, placas moduladoras digitais podem ser obtidas e o desempenho elétrico caracterizado. Investigações de laboratório determinaram que as placas eram capazes de controlar tanto a amplitude quanto a fase, tornando possível uma antena totalmente digital (ESSWEIN, 2003).

5.3 Sistemas Navais com Radares *Phased-Array*

À exceção dos radares em atividade no Brasil, que serão abordados a posteriori neste trabalho, esse tópico tem como propósito apresentar de forma sintética as especificações técnicas e as características de alguns dos principais radares *phased-array* da atualidade; que podem operar com diferentes funcionalidades de acordo com as demandas de cada país.

Torna-se oportuno salientar a supremacia americana, alemã, italiana, francesa e holandesa quanto a este tipo de tecnologia. Sendo assim, ao tomar como parâmetro a difusão global, ou seja, os radares *phased-array* mais utilizados pelo mundo, destacam-se os seguintes:

5.2.1 Radar AN / SPY-1

O AN / SPY-1 é um sistema de radar 3D da Marinha dos Estados Unidos desenvolvido pela Lockheed Martin. O *array* é um sistema passivo escaneado eletronicamente e é um componente chave do Sistema de Combate Aegis e do BMD. De acordo com O'Rourke (2011), o sistema é controlado por computador e usa quatro antenas complementares para

fornecer cobertura total de 360 graus; opera em banda S e é um radar multifuncional de busca, detecção automática, transição para rastreamento, rastreamento de alvos aéreos e de superfície e suporte de combate a mísseis. O sistema foi instalado pela primeira vez em 1973 no USS Norton Sound e entrou em serviço ativo em 1983 como SPY-1A no USS Ticonderoga.

Em sua configuração inicial, no sentido de recepção, possuía 68 subarranjos, cada um compreendendo 64 elementos do tipo guia de onda com fendas totalizando 4.352 elementos por antena. Na transmissão, os subarranjos eram associados em 32 pares, num total de 4.096 desses elementos (MOEN *et al.*, 2013). A Figura 5.6 apresenta o radar AN / SPY-1D (V) embarcado em um navio japonês, um dos atuais detentores desta tecnologia.

Figura 5.6: Painéis das antenas do radar AN/SPY-1D (V) octogonais cinza claro localizados na frente da superestrutura do navio japonês JS Ashigara (DDG-178)



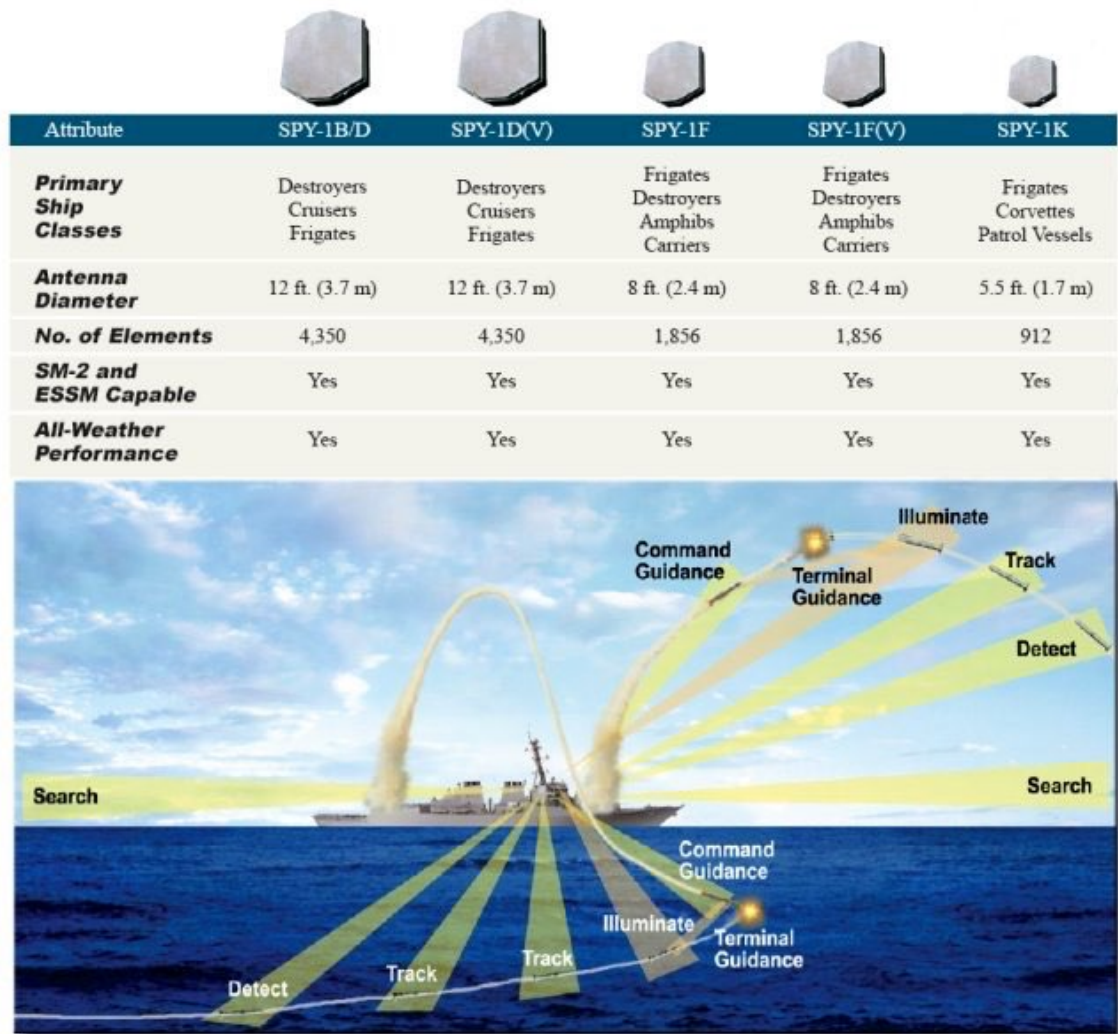
Fonte: SEA FORCES (2021).

O SPY-1 pode manter vigilância contínua enquanto rastreia automaticamente mais de 100 alvos ao mesmo tempo. Os números públicos no alcance de detecção do SPY-1 afirmam que ele pode detectar um alvo do tamanho de uma bola de golfe em alcances superiores a 165 quilômetros. Quando aplicado a um alvo do tamanho de um míssil balístico, o radar SPY-1 tem

um alcance estimado de 310 quilômetros (GREGG *et al.*, 2014). O sistema é projetado para águas azuis e operações litorâneas, entretanto a configuração do SPY-1 deve ser modificada para olhar acima do terreno a fim de evitar excessivos alvos falsos devido à desordem.

A SPY-1 original foi uma versão de teste do radar que nunca foi implantado. As variantes SPY-1A e 1B são equipadas por cruzadores Aegis e têm duas faces de antena em cada uma das duas cabines, enquanto as variantes SPY-1D e 1D (V) são equipadas por *destroyer* Aegis e têm quatro faces de antena, cada antena cobre ligeiramente mais de 90 graus em azimute. Segundo Gregg *et al.* (2014), todos os sistemas U.S. Aegis que foram atualizados para BMD estão equipados com a versão 1B, 1D ou 1D (V). Na Figura 5.7 é possível visualizar a evolução das características do SPY-1.

Figura 5.7: Versões do Radar AN / SPY-1



Fonte: Hebert (2014).

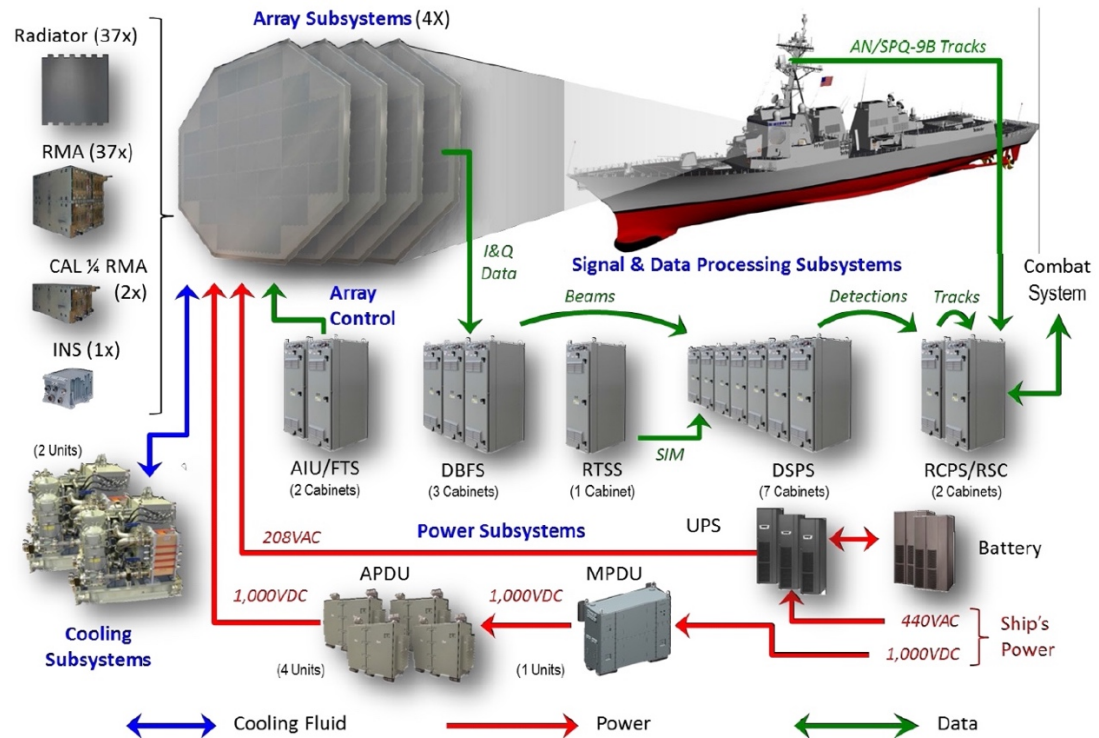
O próximo esforço para modernizar a frota Aegis é denominado Aegis ACB 20, o novo sistema prevê uma versão do contratorpedeiro DDG-51 equipado com um moderno radar, denominado AN / SPY-6, que tem maior capacidade de BMD e Guerra Antiaérea do que o SPY-1 (MDAA, 2021). Esses novos contratorpedeiros DDG-51 estão programados para entrar em serviço em 2023.

5.2.2 Radar AN / SPY-6 AMDR

O AN / SPY-6, denominado também por Radar de Defesa Aérea de Mísseis (*Air and Missile Defense Radar*, AMDR) é um radar 3D de conjunto de defesa aérea e antimísseis com escaneamento eletrônico ativo em desenvolvimento para a Marinha dos Estados Unidos. Ele fornecerá defesa aérea e antimísseis integrada, e até mesmo detecção de periscópio, para os *destroyers* da classe Arleigh Burke; variantes estão em desenvolvimento para adaptação do Burke Flight IIA e instalação a bordo dos porta-aviões FFG (X) da classe Ford e LPDs da classe San Antonio (KEANE; TIBBITTS; JAQUITH, 2019). A primeira entrega do AN / SPY-6 para a Marinha americana ocorreu em 20 de julho de 2020. Este irá equipar o novo USS Jack H. Lucas (DDG 125), navio em construção semelhante a classe Arleigh Burke; que precisou ter 45% de seu casco redesenhado para acomodar o novo radar e sua elevada necessidade energética.

De acordo com o Poder Naval (2018), o sistema AMDR consiste em dois radares primários e um controlador de conjunto de radar para coordenar os sensores. Um radar de banda S deve fornecer busca de volume, rastreamento, discriminação de defesa contra mísseis balísticos e comunicações de mísseis, enquanto o radar de banda X deve fornecer busca de horizonte, rastreamento de precisão, comunicação de mísseis e iluminação terminal de alvos. Os sensores de banda S e banda X também compartilharão funcionalidades, incluindo navegação por radar, detecção de periscópio, bem como orientação e comunicação de mísseis. Os módulos de transmissão e recepção usarão a nova tecnologia de semicondutor com nitreto de gálio (GaN); isso permitirá maior densidade de potência do que os módulos de radar de GaAs anteriores. O novo radar exigirá o dobro da energia elétrica da última versão do SPY-1, enquanto gera 35 vezes mais energia do radar (TOMPKINS; IAMMARTINO; FOSSACECA, 2018). A Figura 5.8 mostra o radar em questão e seus periféricos.

Figura 5.8: Visão geral do sistema AN / SPY-6



Fonte: PODER NAVAL (2018).

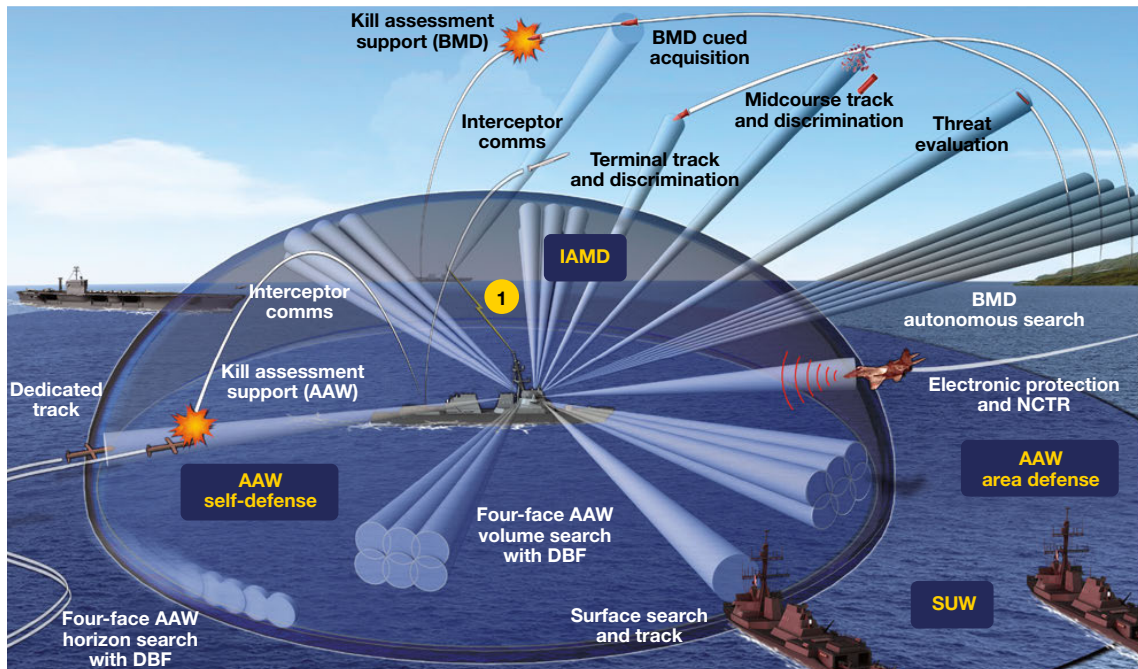
Embora não seja um requisito inicial, conforme aponta O'Haver (2018), o AMDR pode ser capaz de realizar ataques eletrônicos usando sua antena AESA. Todos os candidatos ao *Jammer* de próxima geração da Marinha usam módulos transmissores-receptores baseados em GaN para seus sistemas de GE. A direção precisa do feixe pode atacar ameaças aéreas e de superfície com feixes fortemente direcionados de ondas de rádio de alta potência para aeronaves, navios e mísseis eletronicamente cegos.

O radar é 30 vezes mais sensível e pode controlar simultaneamente mais de 30 vezes a quantidade de alvos em acompanhamento do AN / SPY-1D (V) existente, a fim de conter ataques grandes e complexos (O'HAVER, 2018).

O AN / SPY-6 consiste em um radar *phased-array* de 4 lados com 37 RMAs. Estima-se, segundo Keane *et al.* (2018), que seja capaz de detectar alvos com metade do tamanho e o dobro da distância da última versão do SPY-1, bem como triangular e localizar alvos quando operando em conjunto com outros meios de forma passiva, sem denunciar a posição do navio. É também capaz de defesa simultânea contra mísseis balísticos, mísseis de

cruzeiro, ameaças aéreas e de superfície, bem como realizar atividades de GE. Esse representa o estado da arte na égide de radares *phased-array*.

Figura 5.9: Visão operacional do AN / SPY-6 AMDR



Fonte: O'Haver (2018).

5.2.3 Radar TRS-4D

Há anos, uma variedade de radares *phased-array* para aplicações aéreas e espaciais, bem como navais e terrestres, estão em operação. Representantes notáveis deles foram desenvolvidos e produzidos na Alemanha.

O TRS-4D¹⁰, evolução do célebre TRS-3D, é desenvolvido pela empresa alemã Hensoldt e representa o que há de mais moderno em radar naval multifunção. Faz uso de tecnologia AESA bem estabelecida e opera na banda C (ou banda G). A nova fragata F125 da Marinha Alemã é o primeiro tipo de navio que integra o TRS-4D de forma não rotativa em seus dois mastros. Ambos os mastros contêm dois radares TRS-4D cada, integrados de forma que uma cobertura completa de 360 graus em azimute seja alcançada. O total de 4 radares são funcionalmente integrados para atuar como um sistema de radar completo e, ao mesmo tempo,

¹⁰ O radar 4D é um radar Doppler de pulsado capaz de realizar as funções de um radar 3D padrão e além disso, determinar a velocidade radial de um alvo (KULSHRESTHA, 2015).

fornecer redundância máxima no caso de um ou mais dos radares individuais serem danificados. Conforme Bil e Holpp (2015), como um dos produtos da primeira série, o TRS-4D AESA é baseado na tecnologia GaN.

Figura 5.10: Fragata F222 Baden-Württemberg, equipada com o radar TRS-4D com antenas fixas



Fonte: Galante (2019).

Vários feixes na recepção, cobrindo toda a faixa de elevação, são gerados digitalmente e processados em paralelo. Desta forma, os tempos de parada elevados são alcançados, os quais são necessários para um processamento Doppler preciso e uma estimativa de elevação muito precisa. Além disso, os feixes de recepção podem ser estabilizados eletronicamente para compensar a inclinação e rotação do navio (HOFELE, 2015).

O TRS-4D é um radar definido por *software* que permite aos usuários adaptar continuamente o desempenho do radar às ameaças e cenários operacionais em evolução, com densidades de ameaças e cinemática cada vez maiores, RCS reduzido e imitando o tráfego civil. Segundo Bil e Holpp (2016), o TRS-4D definitivamente irá evoluir com sua formação de feixe embutida, forma de onda e flexibilidade de processamento, juntamente com estabilidade e faixa dinâmica mundial.

5.2.4 Radar AN / SPS-74 (V)

À medida que o desempenho dos sensores de guerra antissubmarino (*Anti submarine Warfare*, ASW) tradicionais da Marinha americana (sistemas de sonar passivos e ativos) se degrada no ambiente litorâneo, sensores ASW alternativos, como radares de detecção de periscópio, são necessários para fornecer capacidade ASW eficaz nessas regiões. Para tal foi desenvolvido o Sistema de Radar AN / SPS-74, que após testes e comprovada eficácia, foi instalado no USS George Washington (CVN 73) (BARFORD; TADDER; GORBY, 2010), mostrado na Figura 5.11.

O sistema de radar AN / SPS-74 (V), opera em banda X, com escaneamento eletrônico feixe estreito, alta taxa de varredura, alta capacidade de processamento, matriz faseada, detecção de periscópio e radar de discriminação que varre rapidamente a superfície do mar ao longo de um 360 graus em azimute, conforme apontam Barford, Tadder e Gorby (2010).

Figura 5.11: Porta-aviões de propulsão nuclear USS George Washington (CVN-73)



Fonte: Barford, Tadder e Gorby (2010).

A função principal do radar é fornecer declarações de periscópio ao navio, detectando e discriminando periscópios na desordem do mar. O sistema apresenta um radar de alta resolução que consiste em um receptor moderno de largura de banda ultralarga, um transmissor de alta confiabilidade e uma antena de varredura de 300 rotações por minuto (FARINA; TIMMONERI, 2014). O processador de dados do radar oferece processamento de dados de alto rendimento usando processadores de fácil reposição.

A detecção de periscópios é especialmente desafiadora, pois muitas vezes ficam ocultos ou obscurecidos pelas ondas do mar e podem ficar expostos por um curto período de tempo. Em cada varredura, o radar passa informações para o processador de dados de alto desempenho para isolamento imediato de possíveis alvos de periscópio da desordem. Usando algoritmos complexos, o processador de dados processa dados potenciais do periscópio com uma função discriminadora multifuncional e, em seguida, fornece alertas automáticos de alvo ao operador.

O display digital do radar apresenta uma imagem da superfície do oceano com ajudas de classificação rápida que ajudam o operador do radar AN / SPS-74 a tomar uma decisão informada sobre a classificação dos alvos detectados. Segundo O’Haver (2018), o sistema de radar é necessário para enfrentar o desafio especificações do sistema para a detecção e classificação de perímetros submarinos. Este sistema é eficaz na exibição de formas de detecção do periscópio submarino, ao mesmo tempo em que exibe muito pouco retorno de desordem gerado pelo oceano. A detecção e o relatório de alertas falsos devem ser reduzidos ao mínimo em todos os tipos de estados do mar.

5.2.5 Radar EMPAR

EMPAR (*European Multifunction Phased-Array Radar*) é um radar de matriz de varredura eletrônica ativa multifuncional de banda G giratória construído pela Selex ES para as marinhas italiana e francesa. Segundo Kulshrestha (2015), esse radar foi projetado para ser o principal sistema de radar a bordo de embarcações navais de médio e grande porte na Europa na última década. O radar oferece cobertura de busca volumétrica completa, busca em baixa altitude e superfície, o rastreamento de vários alvos e a capacidade de *uplink* de informações para orientação de mísseis.

A principal função do EMPAR é a busca volumétrica 3D do ar, fornecendo rumo, alcance e altitude para o tráfego aéreo de até 300 milhas náuticas. É capaz de rastrear aeronaves ou alvos menores, como mísseis. O sistema emprega um único feixe estreito para transmissão, além de feixes múltiplos para recepção. Eles podem ser direcionados eletronicamente, permitindo que o EMPAR faça uma varredura rapidamente em um amplo ângulo de direção

e/ou elevação. Assim, ele fornece o monitoramento simultâneo de um hemisfério inteiro (WATERS, 2014). A face plana do radar é girada a 60 rotações por minuto, permitindo uma varredura por todo o céu muito rapidamente. O sistema, portanto, fornece uma visão quase contínua de 360 graus, em contraste com os sistemas de radar rotativos anteriores, que geralmente levavam dez segundos ou mais para varrer o céu. Essa capacidade é importante para os sistemas de defesa aérea, dada a grande velocidade dos modernos mísseis antinavio (FARINA *et al.*, 2013).

Figura 5.12: EMPAR Radar no *destroyer* italiano Andrea Doria (D-553)



Fonte: Waters (2014).

O EMPAR analisa continuamente os dados que recebe e adapta automaticamente a frequência e a forma de onda que está usando, conforme necessário (WATERS, 2014). Como acontece com todos os radares *phased-array*, é difícil bloquear ou interferir e pode funcionar na presença de uma desordem intensa. Em adição, importante destacar que o EMPAR está em processo de substituição pelo evoluído MFRA (*Multi Functional Radar Active*), um radar AESA multifuncional de banda C rotativo embarcado na classe italiana FREMM Frigate Bergamini.

5.3 Sistemas Navais com Radares *Phased-Array* em operação no Brasil

Em continuação ao tópico 5.2, neste tópico serão abordados as características e especificidades dos radares *phased-array* em operação na MB.

Cabe salientar, de forma introdutória, que o Brasil está um passo atrás das grandes potências frente às novas tecnologias de sensores e que até o presente momento não possui empresa nacional capaz de construir um radar *phased-array* ativo na versão naval de forma completa; sendo necessário a importação de componentes externos. É necessário a busca por parcerias com empresas estrangeiras que possuam a capacidade de fornecer tais equipamentos militares para os meios navais do futuro.

5.3.1 Radar SABER M200

Embora seja uma tecnologia do Exército Brasileiro (EB) empregada em unidades terrestres de artilharia antiaérea, é importante destacar os avanços nacionais quanto à tecnologia *phased-array*; de modo a incitar cada vez mais os estudos e investimentos em tal tecnologia, a fim de colher possíveis frutos futuros referentes a fusões de projetos em todos os campos de aplicações, sobretudo em aplicações navais, foco deste trabalho.

Sendo assim, com suas fases de testes finalizadas em 2016, encontra-se em operação o radar de vigilância aérea SABER M200, evolução do SABER M60, que foi por muito tempo o principal radar para esta função. Bezerra (2019) destaca como crucial a fabricação totalmente nacional entre o Centro Tecnológico do Exército (CTEx) e a empresa Embraer Defesa & Segurança (BRADAR); o que demonstra o fortalecimento desse setor no país. Outrossim, ressalta-se o excelente desempenho que vem sendo verificado em demasiadas aplicações, como Operações de Garantia da Lei e da Ordem (GLO), operações em grandes eventos e exercícios de combate.

No escopo do projeto, além de possuir a tecnologia AESA, o radar SABER M200 é totalmente modularizado, o que possibilita um grande ganho em economia de recursos na logística de manutenção. Desta forma, um módulo defeituoso não torna o radar inoperante, bem como pode ser substituído em poucos minutos, o que maximiza o tempo em operação (CURVELO, 2014).

Figura 5.13: Radar M200 embarcado em viatura do EB



Fonte: BRASIL EM DEFESA (2018).

O M200, também conhecido como “Vigilante”, desempenha as funções de busca e vigilância, designação de alvos para sistemas de armas, meteorologia e controle de tráfego aéreo, com alcance de até 250 minhas náuticas (CTEX, 2020). É um radar definido por *software*, composto por dois radares independentes: o Radar P200 (primário) e o Radar S200 (secundário). Ademais, pode ser transportado por viaturas, navios ou aeronaves, como o C-130 (Hércules) e KC-390, sendo assim, capaz de realizar múltiplas missões.

Quanto às suas principais características, destacam-se: varredura eletrônica ativa por *phased-array*; formação de feixe digital; operação na banda S; *hardware* modular; alto grau de imunidade a GE; e, formas de ondas programáveis (CTEX, 2020).

5.3.2 Radar RAN-20S

A introdução desse radar nos meios da Marinha do Brasil ocorreu a partir dos anos 2000. Empregado nas Fragatas Classe “Niterói” e na Corveta Barroso da MB, o Radar italiano de busca combinada 2D RAN-20S opera na banda S com um alcance de 120 quilômetros e detém tecnologia PESA. Embora ainda operante e bastante utilizada, a tecnologia se mostra defasada em comparação as inovações na égide de radares ativos. A fabricação do primeiro modelo ocorreu na Itália na década de 1990 (LIMA, 2012).

O RAN-20S possui uma antena na qual o feixe de ondas de rádio pode ser direcionado por guias de ondas e linhas de retardo com atrasadores de fase para apontar em determinada direção, sendo que todos os elementos da antena são conectados a um único transmissor de RF (como um magnetron, um klystron ou um tubo de onda viajante) e/ou receptor (GALANTE; POGGIO, 2013).

Conforme Lima (2012), o feixe de irradiação é direcionado eletronicamente para apontar em direções diferentes (antenas fixas) ou com fase fixa (empregado em antenas rotativas), ainda que possa haver alteração entre polarizações. Conforme apresentado no decorrer deste trabalho, a parte negativa desse método é que por haver somente um transmissor, caso ele venha a ser danificado o radar fica inoperante.

De acordo com Galante e Poggio (2013), o RAN-20S detém um transmissor em estado sólido e uma antena rotativa de *phased-array* estabilizada de 4,5 metros composta de 54 colunas com 16 elementos radiantes, totalizando 864 elementos radiantes. A Figura 5.4 ilustra a antena desse radar.

Figura 5.14: Radar RAN-20S



Fonte: Galante e Poggio (2013).

5.3.3 Radar ARTISAN 3D (*Type 997*)

O Radar Avançado de Indicação de Alvos, Percepção e Navegação *Type 997* (*Advanced Radar Target Indication Situational Awareness and Navigation*), também

conhecido como Artisan 3D, é uma criação da empresa BAE Systems Maritime, que foi formada a partir da Italiana Marconi Eletronic e a British Aerospace, para a *Royal Navy* (BAE SYSTEMS, 2020). Atualmente é empregado por 11 fragatas *Type 23* e está em processo de instalação no HMS "*Prince of Wales*" e nas novas fragatas *Type 26*, substitutas da *Type 23*.

Em 2018, foi incorporado à Marinha do Brasil o Navio Aeródromo Multipropósito (NAM) "Atlântico", ex-HMS "Queen Elizabeth". Adquirido junto à Marinha Real Britânica, o navio possui como principal sensor de combate o Artisan 3D. O "Atlântico" é o primeiro navio da Esquadra equipado com esse sofisticado radar.

Figura 5.15: Arte representando o radar Artisan 3D em operação no NAM "Atlântico"



Fonte: SAAB (2020).

Ao adquirir o NAM "Atlântico", o radar teve que sofrer uma customização decorrente das restrições inglesas, principalmente quanto ao uso de frequências específicas da Marinha Real (GUTERRES, 2018). Especulou-se bastante a respeito da degradação de performance diante dessa customização, entretanto, após inúmeros testes realizados pela MB, comprovou-se a excelência e eficácia do sistema. A aquisição desta tecnologia representa um marco histórico para a Armada brasileira e coloca o Brasil em proximidade das potências bélicas no ramo de sensores de guerra.

O radar Artisan 3D, ilustrado na Figura 5.16, de acordo com Padilha (2019), é capaz de detectar objetos com seção reta radar muito pequenas, como a de uma bola de tênis, a mais de 25 quilômetros de distância, conferindo aos detentores de tal tecnologia uma capacidade de detecção incomparável e medidas de proteção eletrônica entre as melhores do mercado de defesa. Além disso, prover cobertura aérea com ângulo de sítio acima de 70 graus e monitorar mais de 900 alvos simultaneamente, entre 200 metros e 200 quilômetros; bem como interferir na comunicação de celulares em 100.000 rádio frequências diferentes. Ademais, possui capacidade para prover controle de tráfego aéreo extensivo e designação de alvos a médio e longo alcance, sendo empregado junto com o sistema de combate do navio (BAE SYSTEMS, 2020).

Figura 5.16: Antena do Radar Artisan 3D



Fonte: Poder Naval (2018).

Quatro militares do grupo de recebimento do navio foram a sede da BAE Systems em Cowes, na época da aquisição, para realizar um treinamento de manutenção e operação deste radar, para que possa ser usado em sua totalidade pela Força Naval brasileira.

No radar RAN-20S, já apresentado, os *arrays* são utilizados apenas para conformar o lóbulo principal da antena, não existindo, portanto, retardadores de fase ou qualquer outra forma de mover o lóbulo ou criar lóbulos para varreduras independentes. Por sua vez, o Artisan 3D opera nas bandas E/F, realiza varredura eletrônica e utiliza uma matriz de *array* com 16 módulos T/R de estado sólido para criar os diferentes lóbulos e realizar todas as suas funções

anteriormente descritas com economia de recursos em relação ao número de elementos (GALANTE, 2018).

Em adição, possui destaque a sua tecnologia de transmissão por rádio frequência através de fibra óptica e um avançado sistema de refrigeração, que o tornam atualmente, uma colossal opção para vigilância aérea e de superfície para Marinhas modernas. Segundo Galante (2018) este sistema permite o mesmo operar inclusive sob ação de forte interferência eletrônica.

De acordo com Padilha (2020), o Artisan 3D é centrado em *software* com tecnologia *beamforming* digital e processamento Doppler (feixes criados através de pulsos digitais). Além disso, possui qualidade superior em prontidão situacional tática como sensor primário, rastreamento e detecção automáticos, suporte de identificação de amigo ou inimigo (*Identification Friend or Foe*, IFF), proteção eletrônica contra *Jammers* e capacidade de integrar diferentes sistemas de armas de defesa.

A BAE Systems Maritime desenvolveu uma nova versão do Artisan munido com um sistema de estabilização eletrônica, que propicia uma estabilização mais rápida, menor peso e uma redução dos custos com manutenção a longo prazo (BAE SYSTEMS, 2020). Esta versão irá equipar os novos *Type 26* da Royal Navy, e também a futura classe de fragatas “Tamandaré” da Marinha do Brasil, caso o Artisan 3D venha a ser confirmado.

Para bem compreender esta razão, a principal diferença entre a versão de estabilização mecânica utilizada atualmente e a eletrônica, é a velocidade com que o radar passou a compensar os movimentos do navio no mar, o que se traduz em rapidez no processamento, e um custo mais baixo na sua manutenção, embora a versão mecânica ainda seja muito confiável (PADILHA, 2019).

No tocante ao sistema de defesa antiaérea, algumas fragatas *Type 23* estão equipadas com o míssil Sea Ceptor, totalmente integrado e legitimado com o Artisan 3D. Indiscutível argumentar a importância desse fato para a MB, já que o Sea Ceptor foi conferido como o míssil antiaéreo da classe “Tamandaré”, conforme apresenta Poder Naval (2018). Segundo Padilha (2020), quanto ao ciclo de vida desse radar, cabe apontar o seguinte:

Para a Marinha do Brasil, a BAE Systems Maritime tem um plano de manutenção para o ciclo de vida do radar igual ao que está sendo proposto para o NAM “Atlântico”, que inclui inclusive a proposta para a troca do sistema de estabilização mecânica pelo sistema eletrônico, o que tornaria o radar do “Atlântico” igual ao dos futuros navios da classe Tamandaré e da corveta “Barroso”, que receberá o mesmo modelo através do *offset* do programa, e assim ter o mesmo processo de manutenção, reduzindo custos e aumentando o tempo de vida útil do equipamento.

A BAE Systems Maritime busca soluções a fim de prover a seus radares um baixo gasto com manutenção frente a tendência global de redução de custos, com isso, elevando significativamente a vida útil de seus equipamentos (GUTERRES, 2018). Os sistemas navais atuais são compostos de alta tecnologia e isso em alguns casos significa preços de aquisição e de manutenção bem altos, por isso a BAE Systems Maritime projetou o Artisan 3D com componentes comerciais, conferindo ao radar alta confiabilidade e disponibilidade operacional (PADILHA, 2019).

No que se refere ao potencial estratégico, é indiscutível argumentar que a introdução de radares *phased-array* em meios de superfície da MB traz consigo uma ampla capacidade de aplicações em combate, em especial os de matrizes ativa. O uso judicioso e eficaz desses sensores pode conferir elevada dissuasão extrarregional e possibilitar, caso necessário, o engajamento preciso de inúmeros alvos simultâneos no teatro de operações.

5.4 O Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul e as Perspectivas da Marinha do Brasil face ao uso dos Radares *Phased-Array*

O Brasil é o maior país da América do Sul e a sua diversidade fisiográfica confere uma elevada importância geoestratégica, tanto em termos territoriais, devido a sua abrangência continental, quanto em termos marítimos, em razão da extensão de 7,4 mil quilômetros de costa (GUERRA, 2015). De acordo com a Marinha do Brasil (2021):

O Estado brasileiro possui o direito de explorar uma extensa área oceânica, com cerca de 5,7 milhões de km², o que equivale a, aproximadamente, metade da nossa massa continental. No mar estão as reservas do pré-sal e dele retiramos cerca de 95% do petróleo, 80% do gás natural e 45% do pescado produzido no País. Por nossas rotas marítimas, escoamos mais de 95% do comércio exterior brasileiro. Nessa área existem recursos naturais e uma rica biodiversidade ainda inexplorados.

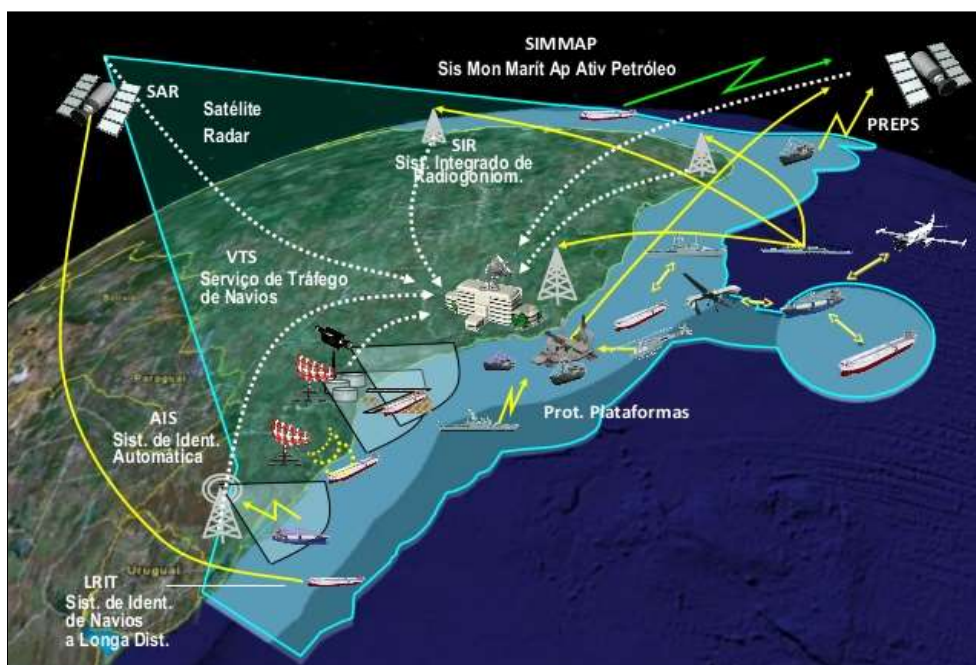
A proteção dessas riquezas é prioridade dentro do planejamento da defesa por ser considerada uma área vital e com alta concentração de poder político, científico e econômico. A negação do uso do mar ao inimigo é o que norteia, antes de atendidos quaisquer outros objetivos estratégicos, a estratégia de defesa marítima do Brasil (BRASIL, 2012). Desta forma, a MB conduz trabalhos notáveis no desenvolvimento de suas capacidades, com o fito de manter-se atualizada e aprestada para sua missão.

Nesse diapasão, torna-se evidente a necessidade de um sistema que resguarde os direitos do Brasil sobre o mar, então, em consonância às diretrizes da Estratégia Nacional de Defesa (END) e com intuito de resolver essa problemática, a MB criou o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), o qual Junior (2016) leciona que:

Consiste em um conjunto de subsistemas integrados, incluindo mecanismos de apoio à decisão, que coletam, armazenam e processam dados e compartilham informações de interesse com os diversos setores relacionados e seus tomadores de decisão, seja no âmbito civil ou militar.

Além do interesse em possuir um radar singular e de extrema valia para a defesa nacional, de acordo com During (2014), há ainda a necessidade de integração com o SisGAAz, que visa agregar diferentes sistemas a fim de ampliar o controle e manter a vigilância contínua sobre as Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB).

Figura 5.17: Integração do SisGAAz



Fonte: During (2014).

Face ao exposto, esses radares se apresentam como uma excelente ferramenta de vigilância, podendo integrar e cumprir de forma precisa as necessidades do SisGAAz. Diante das características dos radares *phased-array*, em especial o Artisan 3D, amplamente discutidas nesta pesquisa é admissível inferir que tais radares podem atender sem óbices às demandas sistêmicas exigidas. Para compor a rede de sistemas do SisGAAz o radar Artisan 3D pode atuar ampliando o alcance de vigilância sobre o mar, em vista a sua capacidade de monitorar uma elevada cobertura aérea; capacidade de acompanhamento de mais de 900 alvos simultaneamente; prover controle de tráfego aéreo extensivo; suporte à identificação de alvos e flexibilidade quanto a integração em outros sistemas.

Além disso, o binômio radares *phased-array* e sistemas satelitais podem fornecer maior precisão em informações sobre as embarcações navegando através da área de cobertura cruzada de ambos os sistemas. Performando assim, uma alta confiabilidade em vigilância.

Após a apresentação dessas informações é razoável concluir que o projeto do SisGAAz configura um excelente recurso para manutenção da vigilância marítima na costa brasileira. Adicionalmente, permite ao Brasil a evolução do seu status *quo* em matéria de segurança marítima, bem como auxilia na consolidação do poder geopolítico do estado brasileiro perante outros países. Não obstante, esse sistema pode atuar como fator dissuasor de possíveis atos hostis ao Brasil que ameacem a segurança nacional ou crimes que possam ocorrer nas AJB.

5.5 Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)

Embora os radares *phased-array* representem inúmeros benefícios para a defesa do país, encontrar financiamento para esses projetos pode não ser uma tarefa simples. Fato é que, atualmente, constata-se escassez de recursos em diversas áreas do setor público (FIA, 2021). Além disso, espera-se um decréscimo na economia para os próximos anos, virtude a atual crise econômica e sanitária em que o mundo se encontra; esse processo será pautado em reformas fiscais e cortes de gastos em diversos setores.

Por conseguinte, é notório a existência de um contrassenso de dados e informações, enquanto o Brasil passa por um período de contingenciamento de verbas públicas, faz-se necessário cada vez mais a implantação de radares e sistemas com elevados custos de aquisição. E, para elucidar essa problemática é preciso realizar uma análise apurada sobre os gastos do Brasil no âmbito da defesa nacional, bem como com o setor de P&D, ambos os gastos intimamente ligados.

Os gastos com o setor de defesa e P&D representam um importante indicativo de poder e crescimento econômico de um país. No Brasil, os gastos nesse setor apresentaram um aumento no decorrer dos anos. No entanto, essa participação em relação ao PIB ainda está abaixo da média mundial (PADILHA, 2020).

Além disso, vale destacar que a maioria dos investimentos voltados para P&D na área militar são oriundos da iniciativa privada, tendo em vista, que as empresas nesse ramo são detentoras dos meios de produção e possuem maior acesso às matérias-primas necessárias para a realização das pesquisas. O governo pode atuar criando políticas públicas que incentivem ou atenuem os investimentos nessa área a fim de manter o equilíbrio do mercado interno (ARRUDA, 2019). Essa afirmação corrobora com os fatos observados no desenvolvimento e pesquisa dos radares americanos da série SPY e do europeu EMPAR e suas derivações. Em ambos os modelos houve aplicações pesadas e contínuas por parte dos governos envolvidos em empresas do setor privado.

Nesse sentido, uma excelente saída para a falta de recursos investidos em P&D são as parcerias com as universidades, que além de favorecer a área acadêmica podem contribuir ainda para o desenvolvimento do setor de pesquisas nacional. Como citado anteriormente nesse tópico, um entrave para esses investimentos pode ocorrer por meio de cortes no orçamento, nesse caso, cortes destinados para universidades públicas e institutos federais de ensino, como ocorrido no ano de 2019 (TENENTE; FIGUEIREDO, 2019).

Assim, em vista da relevância do setor de P&D nacional para o aprimoramento e criação de novas tecnologias, fica claro que a negligência nessa área pode atrapalhar sobremaneira o processo de desenvolvimento de inovações e a captação de recursos para a obtenção ou até mesmo a construção de radares com tecnologia *phased-array* no Brasil.

6 CONCLUSÃO

Através da pesquisa da literatura utilizada neste trabalho e corroborando com os estudos feitos, constata-se que os radares *phased-array* tem sido os baluartes dos projetos de navios mais modernos existentes no globo e têm definido as características das estruturas e design dos meios navais e conseqüentemente o cerne dos sistemas de combate desses meios. O aprimoramento da tecnologia de *phased-array*, em todas suas vertentes, possibilita a manutenção do domínio eletromagnético de forma mais eficiente, o que contribui sobremaneira para um elevado sucesso nas ações no âmbito da GE.

Para permitir ao leitor um profundo entendimento sobre o tema foram levantadas as características mais proeminentes no universo dos radares *phased-array*, desde dados técnicos até fatos históricos relevantes para essa pesquisa. Foram apresentadas as características gerais tanto de um radar genérico como as de radares com tecnologia de matrizes faseadas e suas variantes, bem como comparações quanto aos seus princípios de funcionamento e funções empregadas; em adição, as possibilidades de arranjos e arquiteturas de matrizes desses radares, as preeminentes tendências tecnológicas relativas ao tema, os principais sistemas navais que utilizam tal tecnologia em correlação aos radares *phased-array* da MB. E, por fim, uma breve exposição referente ao SisGAAz e as perspectivas da MB perante tal tecnologia, bem como o atual cenário nacional no setor de P&D. Isso permitiu comensurar a importância dada por diversos países a esses radares e entender ainda porque o Brasil deve envidar esforços a fim de evoluir a tecnologia nacional existente sobre esse equipamento e ampliar a quantidade de radares que possui.

Ao observar as peculiaridades apresentadas pelos modernos radares com tecnologia *phased-array* é possível concluir que além de apresentar inúmeras vantagens para a defesa nacional, como engrandecimento do status *quo* em matéria de segurança marítima, além de atuar como fator dissuasor de possíveis atos hostis que ameacem a segurança nacional ou crimes que possam ocorrer nas AJB, funciona também como um subsistema do SisGAAz, empregado em conjunto a outros sistemas de defesa.

O desenvolvimento tecnológico das matrizes faseadas, cada vez mais sofisticadas, tem garantido o diferencial tático e estratégico no cenário internacional, tornando os demais

modelos pouco competitivos frente a ela. As Forças Armadas, diante de um reposicionamento estratégico, alinhados com a PND e com a END, juntamente com as empresas parceiras, vêm construindo o fomento da Base Industrial de Defesa, confrontando a dependência de sistemas importados, o que ainda é uma realidade no país. Desta forma, contribuem para o progresso nacional com a geração de milhares de empregos diretos e indiretos nas áreas de ciência e tecnologia, além de inserir a comunidade acadêmica nos assuntos de defesa; premissas fundamentais para que o Brasil consiga se estabelecer enquanto potência emergente.

Em vista dos argumentos apresentados no decorrer deste trabalho, é nítido o grande potencial de emprego e a conjectura de possibilidades de extensão dos sistemas aqui expostos. Com isso, ressalta-se a importância da MB e do setor de defesa imprimirem esforços na aquisição e desenvolvimento de radares de ponta, assim como o Artisan 3D; objetivando, primeiramente, o emprego nas futuras fragatas classe “Tamandaré”, e por conseguinte, nos projetos pósteros.

Nestas últimas palavras, insta salientar que a evolução tecnológica vem, com frequentes saltos, impactando continuamente os limites das capacidades do Poder Naval. A aquisição do radar naval Artisan 3D, representou um marco para a indústria nacional de defesa, pois tornou o país detentor de importante e complexa tecnologia militar, assim como pôde aumentar consideravelmente o seu poder dissuasório ante ameaças de potências intra e extrarregionais.

Embora almeja-se a aquisição de modernos e eficazes sistemas radares, bem como o domínio nacional no desenvolvimento de tal tecnologia é fato que esta realidade não é imediata, levando em conta as restrições orçamentárias impostas a Defesa; visto que, atualmente, o Estado brasileiro passa por dificuldades na Economia; agravada ainda, pela crise financeira global ocasionada pela pandemia da COVID-19. Ressalta-se, entretanto, o crescente dinamismo nas evoluções tecnológicas, aliada à reconhecida capacidade humana disponível no Brasil, fatores que podem driblar, na medida do possível, as adversidades econômicas e propiciar celeridade a tal perspectiva.

6.1 Considerações Finais

Diante das informações e características apontadas nesse trabalho sobre os radares *phased-array* é inegável que tais radares resultam em inúmeras vantagens e benéficas para o setor de defesa nacional dos países que possuem essa tecnologia. Não obstante, o Brasil, observando tais benefícios, adquiriu o primeiro meio com radar com tecnologia 3D ativa, o Artisan 3D; o qual agrega sobremaneira no fortalecimento do Poder Naval e da soberania nacional. Porém, devido às restrições no orçamento e aos projetos em aberto, que comprometem grande parte dos recursos voltados para a Defesa, o investimento nesses equipamentos ainda é embrionário.

O momento é de crise, sem dúvidas. O Brasil não está em guerra, e não há conflito surgindo no horizonte, mas deve-se sempre contar com uma força de envergadura, conforme aponta Guterres (2018). A Força Naval brasileira movimenta-se, e iniciativas excelentes surgem dia após dia. Além da aquisição do NAM “Atlântico” com seu moderno Artisan 3D, e das futuras fragatas “Tamandaré”, o Brasil mantém forte investimento no programa de submarinos e em melhorias de nossos meios. Por toda resposta, sabe-se que somente com constantes investimentos, pode-se manter o protagonismo nos mares que o Brasil sempre almeja.

O presente trabalho não anseia esgotar o assunto abordado, mas sim servir como uma fonte primária de estudos, fornecendo um primeiro contato sobre o assunto tratado e dando embasamento teórico para posteriores aprofundamentos nesta temática.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Suscita-se que esses sistemas aqui expostos continuem a ser estudados e aprimorados para melhor compreensão sobre o tema e, com isso, atue como um meio facilitador pela busca de formas inovadoras de articulações dos sistemas e do domínio da tecnologia; a fim de contribuir para geração de conhecimento, não só para os usuários finais da tecnologia, mas também para o meio acadêmico. Dessa forma, as informações apresentadas poderão ser usadas como bases para futuros estudos, como os sugeridos a seguir:

- a) Abordagem aprofundada e analítica a respeito da distribuição das antenas a bordo dos meios da MB, dado o grande número de antenas;

- b) Implantação de antenas *phased-array* em ambientes eletromagnéticos complexos, como em aplicações 5G; e
- c) Análise de aplicabilidade das tendências tecnológicas expostas neste trabalho nos meios da MB.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Phillip E.; HOLBERG, Douglas R. **CMOS analog circuit design**. Elsevier, 2011.
- ARRUDA, C. M. **Despesa ou investimento? P&D militar para o crescimento econômico brasileiro**. Universidade de Brasília (UnB). Brasília, p. 110. 2019.
- BABAKHANI, Aydin *et al.* A 77GHz 4-element phased array receiver with on-chip dipole antennas in silicon. In: **2006 IEEE International Solid State Circuits Conference-Digest of Technical Papers**. IEEE, p. 629-638, 2006.
- BAE SYSTEMS. **Artisan Medium Range Radar Type 997**. 2020. Disponível em: <https://www.baesystems.com/en/product/artisan-medium-range-radar-type-997>. Acesso em: 14 mar. 2021.
- BALL, Robert E. **The fundamentals of aircraft combat survivability: analysis and design**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- BARFORD, Ian; TADDER, Mark; GORBY, Christopher. The AN/SPS-74 Periscope Detection Radar System. **Naval Surface Warfare Center, Dahlgren Division, Corporate Communications, C6, 6149 Welsh Road, Suite 239, Dahlgren, VA, 22448-5130**, p. 80, 2010.
- BARTEE, Jon A. **Genetic algorithms as a tool for phased array radar design**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2002.
- BARTON, David K. Universal equations for radar target detection. **IEEE transactions on aerospace and electronic systems**, v. 41, n. 3, p. 1049-1052, 2005.
- BARTON, Donny C. MAFET thrust 1 program to develop MW/MMW design tools. In: **1998 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 98TH8339)**. IEEE, p. 239-248, 1998.
- BEZERRA, Marcus Emanuel Azevedo. **O projeto Radar SABER e as capacidades da indústria brasileira para seu desenvolvimento**. 2019.
- BIL, Ryszard; HOLPP, Wolfgang. Modern phased array radar systems in Germany. In: **2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)**. IEEE, p. 1-7, 2016.
- BIL, Ryszard; HOLPP, Wolfgang. Naval radar trends: A look back-a look forward. In: **2015 16th International Radar Symposium (IRS)**. IEEE, p. 13-19, 2015.
- BLILEY TECHNOLOGIES. **Understanding AESA: A Game-Changer in RADAR Technology**, 2017. Disponível em: <https://blog.bliley.com/understanding-aesa-radar-tech>. Acesso em: 7 mar. 2021.
- BRASIL. Marinha do Brasil. **Centro de Comunicação Social da Marinha**. Brasília: 2021. Disponível em: https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia_azul/index.html. Acesso em: 29 abr. 2021.

COOLEY, Michael. Phased array fed reflector (PAFR) antenna architectures for space-based sensors. In: **2015 IEEE Aerospace Conference**. IEEE, p. 1-11, 2015.

CTEX. Centro Tecnológico do Exército. **Radar SABER M200**. 2020. Disponível em: <http://www.ctex.eb.mil.br/projetos-em-andamento/82-radar-saber-m200#vis%C3%A3o-geral>. Acesso em: mar. 2021.

CURVELO, Adler Santos. **Radares da AAAe brasileira: sua história e evolução**. 2014.

DOGARU, Traian. **Doppler Processing with Ultra-Wideband (UWB) Radar Revisited**. US Army Research Laboratory Adelphi United States, 2018.

DORSEY, W. Mark *et al.* **RF photonic, in-situ, real-time phased array antenna calibration system**. Naval Research Laboratory Washington Dc Radar Analysis Branch, 2010.

DURING, N. SisGAAz – **Um projeto ambicioso**. Defesanet, 2014. Disponível em: <http://www.defesanet.com.br/sisgaaaz/noticia/13964/SisGAAz-%E2%80%93-Um-projeto-ambicioso/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

EDWARDS, Terry. Semiconductor technology trends for phased array antenna power amplifiers. In: **2006 European Radar Conference**. IEEE, p. 269-272, 2006.

ENDER, Joachim HG *et al.* Progress in *phased-array* radar applications. In: **IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005**. IEEE, p. 4, 2005.

ESSWEIN, Lance C. **Genetic algorithm design and testing of a random element 3-D 2.4 GHz phased array transmit antenna constructed of commercial RF microchips**. Naval Postgraduate School Monterey CA, 2003.

FARINA, A. *et al.* AESA radar—Pan-domain multi-function capabilities for future systems. In: **2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology**. IEEE., p. 4-11, 2013.

FARINA, A.; TIMMONERI, L. Phased array systems for air, land and naval defence applications in Selex ES. In: **The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)**. IEEE, p. 560-564, 2014.

FENN, Alan J. *et al.* The development of phased-array radar technology. **Lincoln Laboratory Journal**, v. 12, n. 2, p. 321-340, 2000.

FIA. Cenário Econômico Mundial: Tudo que Você Precisa Saber. **Fundação Instituto de Administração**, 2021. Disponível em: <https://fia.com.br/blog/cenario-economico-mundial/>. Acesso em: 29 abr. 2021.

GALANTE, A. Poder Naval. **Brasileiros aprendem sobre o radar Artisan 3D na Inglaterra**. 2018. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/04/27/brasileiros-aprendem-sobre-o-radar-artisan-3d-na-inglaterra/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

GALANTE, A. Poder Naval. **Radar naval TRS-4D – para o Presente e Futuro**. 2019. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2019/08/28/radar-naval-trs-4d-para-o-presente-e-futuro/>. Acesso em: 8 abr. 2021.

GALANTE, A; POGGIO, G. **Por dentro da ModFrag da Classe Niterói**. 2013. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/01/25/f40-aos-quarenta-sexta-parte/>. Acesso em: 30 mar. 2021.

GOFFER, Amit P.; KAM, Moshe; HERCZFELD, Peter R. Design of phased arrays in terms of random subarrays. **IEEE transactions on Antennas and Propagation**, v. 42, n. 6, p. 820-826, 1994.

GREGG, Susan P. *et al.* Lessons from AEGIS: Organizational and Governance Aspects of a Major Product Line in a Multi-Program Environment. In: **Proceedings of the 18th International Software Product Line Conference-Volume 1**, p. 264-273, 2014.

GROGER, I.; SANDER, W.; WIRTH, W.-D. Experimental phased array radar ELRA with extended flexibility. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, v. 5, n. 11, p. 26-30, 1990.

GUERRA, Wilson Barbosa. A influência dos avanços tecnológicos no poder naval brasileiro no século XXI. **Revista da Escola de Guerra Naval**, v. 21, n. 1, p. 283, 2015.

GUTERRES, Joao Paulo Taveira. Entre abandonos e investimentos. **Revista Marítima Brasileira**, v. 138, n. 01/03, p. 118-118, 2018.

HANSEN, Robert C. **Phased array antennas**. John Wiley & Sons, 2009.

HASHEMI, Hossein; GUAN, Xiang; HAJIMIRI, Ali. A fully integrated 24 GHz 8-path phased-array receiver in silicon. In: **2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference (IEEE Cat. No. 04CH37519)**. IEEE, p. 390-534, 2004.

HEBERT, David C. **Radar resource management in a dense target environment**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA DEPT OF OPERATIONS RESEARCH, 2014.

HENDRIX, Robert. Aerospace system improvements enabled by modern phased array radar. **Northrup Grumman white paper**, 2002.

HERD, Jeffrey S.; CONWAY, M. David. The evolution to modern phased array architectures. **Proceedings of the IEEE**, v. 104, n. 3, p. 519-529, 2015.

HERD, J.; DUFFY, S. Overlapped digital subarray architecture for multiple beam phased array rada. In: **Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)**. IEEE, p. 3027-3030, 2011.

HOFELE, F. X. Radar detection in maritime environment: Dependence on the radar antenna height in duct situations. In: **2015 16th International Radar Symposium (IRS)**. IEEE, p. 822-827, 2015.

HOST, P. **Update: Echodyne develops family of metamaterial electronically-scanning array radars**. 2020. Disponível em: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/update-echodyne-develops-family-of-metamaterial-electronically-scanning-array-radars>. Acesso em: 12 mar. 2021.

JENN, D. C. *et al.* Digital antenna architectures using commercial off-the-shelf hardware. In: **IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004**. IEEE. p. 3241-3244, 2004.

JENN, David *et al.* Distributed phased arrays and wireless Beamforming networks. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 5, n. 4, p. 283-302, 2009.

JUNIOR, A. K. I. **Importância Estratégica da Implantação do SisGAAz**. Revista Marítima Brasileira, Rio de Janeiro, p. 145-162. 2016.

KEANE, Robert G. *et al.* The Goldilocks Effect in Naval Ship Design: Too Little, Too Much, Just Right. In: **SNAME Maritime Convention**. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2018.

KEANE, Robert G.; TIBBITTS, Barry F.; JAQUITH, Peter E. The Navy's Ship Design Factory: NAVSEA—The “Golden Goose”. **Naval Engineers Journal**, v. 131, n. 3, p. 61-78, 2019.

KOPP, Bruce A. S and X-band radar transmit/receive module overview. In: **2007 IEEE Radar Conference**. IEEE. p. 948-953, 2007.

KOPP, Carlo. Future AEW&C capabilities for maritime warfare. 2012.

KULSHRESTHA, Sanatan. Naval Sensors—A Perspective. **Sp's Military Year Book**, 2015.

KUNDTZ, Nathan. Next generation communications for next generation satellites. **Microwave Journal**, v. 57, n. 8, p. 56, 2014.

LILLY, Andrew Stuart. **Generic radar modelling**. Tese de Doutorado. University College London (United Kingdom). 2000.

LIMA, S. W. Defesa Net. A Fragata F-43 Liberal. 2012. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/naval/noticia/5629/A-Fragata-F-43-Liberal/>. Acesso em: 14 mar. 2021.

LUPA, Israel. Phased array—Technology and trends. In: **2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems**. IEEE. p. 1-8, 2008.

MAILLOUX, Robert J. **Phased array antenna handbook**. Artech house, 2017.

MANTHRI, S. **How X-Band Transmit Receive Modules are Impacting the AESA Radar Market**, 2019. Disponível em: <https://www.cyient.com/blog/aerospace-defense/how-x-band-transmit-receive-modules-are-impacting-the-aesa-radar-market>. Acesso em: 18 mar. 2021.

MOEN, Bente E. *et al.* Accidental exposure to electromagnetic fields from the radar of a naval ship: a descriptive study. **International maritime health**, v. 64, n. 4, p. 177-182, 2013.

MICHELI, Victor A. **Active Phased Array Radar Analysis**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 1996.

MIZUMOTO & SHOJI LABORATORY. **Instituto de Tecnologia de Tokyo**, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. 2019. Disponível em: <http://mizumoto-www.pe.titech.ac.jp/subject/devices.html>. Acesso em: 16 mar. 2021.

MDAA. **AN / SPY-1 Radar**. 2021. Disponível em: <https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/anspy-1-radar/>. Acesso em: 11 mar. 2021.

NATARAJAN, Arun; KOMIJANI, Abbas; HAJIMIRI, Ali. A 24 GHz phased-array transmitter in 0.18/spl mu/m CMOS. In: **ISSCC. 2005 IEEE International Digest of Technical Papers. Solid-State Circuits Conference, 2005**. IEEE. p. 212-594, 2005.

NATARJAN, A. et al. A 77GHz Phased-Array Transmitter with Local LO-Path Phase-Shifting in Silicon. In: **2006 IEEE International Solid State Circuits Conference-Digest of Technical Papers**. IEEE. p. 639-648, 2006.

NICKEL, Ulrich. **Fundamentals of signal processing for phased array radar**. FGAN-FHR RESEARCH INST FOR HIGH FREQUENCY PHYSICS AND RADAR TECHNIQUES WACHTBERG (GERMANY), 2006.

NPS. **Escola de Pós-Graduação da Marinha dos Estados Unidos da América**. 2021. Disponível em: <https://nps.edu/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

O'HAVER, Kenneth W. *et al.* Radar development for air and missile defense. **Johns Hopkins APL Tech. Digest**, v. 34, n. 2, p. 140-153, 2018.

O'ROURKE, Ronald. **Navy Aegis Ballistic Missile Defense (BMD) Program: Background and Issues for Congress**. DIANE Publishing, 2011.

PADILHA, L. Defesa Aérea & Naval. **O poderoso radar da Fragata Type 26 da Royal Navy**. 2020. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/artisan-3d-o-poderoso-radar-da-fragata-type-26-da-royal-navy>. Acesso em: 30 mar. 2021.

PADILHA, L. Defesa Aérea & Naval. **Radar Artisan 3D da BAE Systems Maritime é pré-selecionado para equipar a Classe 'Tamandaré' da Marinha do Brasil**. 2019. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/artigos/radar-artisan-3d-da-bae-systems-maritime-e-pre-selecionado-para-equipar-a-classe-tamandare-da-marinha-do-brasil-amp>. Acesso em: 30 mar. 2021.

PIERNO, Luigi *et al.* Fibre optics in radar systems: Advantages and achievements. In: **2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)**. IEEE. p. 1627-1633, 2015.

PODER NAVAL. **PHM Atlântico chegará ao Rio com os 4 lanções Mk.5B e vários sensores em uso na Marinha Real**. 2018. Disponível em: <http://www.naval.com.br/blog/>

2018/06/01/nphm-atlantico-chegara-ao-rio-com-os-4-lanchoes-mk-5b-e-varios-sensores-em-uso-na-marinha-real/. Acesso em: 19 mar. 2021.

PODER NAVAL. **US Navy: 74o destróier classe Arleigh Burke em construção.** 2018. Disponível em: <http://www.naval.com.br/blog/2018/05/11/73o-destroier-classe-arleigh-burke-em-construcao-para-a-us-navy/l>. Acesso em: 3 abr. 2021.

POMPEO, B.S; DO VAL, J.B.R; MENDES, R.S. **Comparação e Criação de diagramas de antena phased array linear utilizando três métodos diferentes de otimização.** XXX Simpósio brasileiro de telecomunicações. Brasília, DF. 2012.

RICHARDS, Mark A. et al. Principles of modern radar volume i-basic principles. 2010.

SAAB. **3D Artisan scanning.** 2020. Disponível em: https://www.saab.com/siteinfo/search?query=3d+artisan+3d+pnm+alt%C3%A2ntico#7903_query_3d%20artisan%203d%20pnm%20alt%C3%A2ntico_tab_0_skip_30. Acesso em: 26 mar. 2021.

SABATINI, Sergio; TARANTINO, Marco. Multifunction array radar- System design and analysis (Book). **Norwood, MA: Artech House, 1994.**

SCHWARTZ, Paul. **Russia's Contribution to China's Surface Warfare Capabilities: Feeding the Dragon.** Rowman & Littlefield, 2015.

SEA FORCES. **Japan Maritime Self Defense Force / JMSDF - Guided Missile Destroyer.** 2021. Disponível em: https://www.seaforces.org/marint/Japan-Maritime-Self-Defense-Force/Destroyer/Atago-class_DAT/DDG-178-JDS-Ashigara.htm. Acesso em: 29 mar. 2021.

SOMMERVILLE, Donald; WESTWELL, Ian. **The Complete Illustrated History of World War II: An Authoritative Account of One of the Deadliest Conflicts in Human History with Analysis of Decisive Encounters and Landmark Engagements.** [S.l.], Lorenz, 2011.

SKOLNIK, Merrill I. **Radar handbook.** McGraw-Hill Education, 2008.

SMITS, A. B; VAN GENDEREN, P. “The APAR multifunction radar - system overview”, **IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology**, Boston, MA, pp. 241-246, 2003.

TENENTE, A; FIGUEIREDO. **Entenda o corte de verba das universidades federais e saiba como são os orçamentos das 10 maiores.** G1, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/educacao/noticia/2019/05/15/entenda-o-corte-de-verba-das-universidades-federais-e-saiba-como-sao-os-orcamentos-das-10-maiores.ghtml>. Acesso em: 5 abr. 2021.

THALES. **APAR – Active Phased Array Multifunction Radar.** 2019. Disponível em: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/apar-active-phased-array-multifunction-radar>. Acesso em: 23 mar. 2021.

TOMPKINS, Matthew; IAMMARTINO, Ronald; FOSSACECA, John. Multiattribute Framework for Requirements Elicitation in Phased Array Radar Systems. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 67, n. 2, p. 347-364, 2018.

TORNAZAKIS, Ioannis. **Development of a Distributed Digital Array Radar (DDAR)**. Tese de Doutorado. Monterey, California. Naval Postgraduate School. 2008.

TOSO, Giovanni; MAILLOUX, Robert. Guest editorial for the special issue on innovative phased array antennas based on non-regular lattices and overlapped subarrays. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 62, n. 4, p. 1546-1548, 2014.

URZAIZ, Fernando Ibañez *et al.* Design, implementation and first experimental results of an X-band ubiquitous radar system. In: **2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)**. IEEE., p. 1150-1155, 2018.

VAN KEUREN, David K. Science goes to war: The radiation laboratory, radar, and their technological consequences. **Reviews in American History**, v. 25, n. 4, p. 643-647, 1997.

VISSER, Hubregt J. **Array and phased array antenna basics**. Chichester, UK.: Wiley, 2005.

WANG, E. Y., **Notes for EE262 (Antenna Theory & Design)**. UCLA, 2002. Disponível em: <http://www.ee.ucla.edu/~ywang/EE262/notes.htm>. Acesso em: 25 mar. 2021.

WATERS, Conrad (Ed.). **Seaforth World Naval Review 2015**. Seaforth Publishing, 2014.

WITAN WORLD. **Active Electronically Scanned Array Radars**. 2020. Disponível em: <https://witanworld.com/article/2020/07/19/aesa-active-electronically-scanned-array-radars/>. Acesso em: 28 mar. 2021.

WOLFF, C. **Radar Principle**. Radar Tutorial, 2021. Disponível em: <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Principle.en.html>. Acesso em: 26 fev. 2021.

WORD DISK. **Active Electronically Scanned Array**. 2017. Disponível em: https://worddisk.com/wiki/Active_electronically_scanned_array/. Acesso em: 28 mar. 2021.

WORMS, Josef G. ECM and ECCM against broadband radar using stretch processing. In: **IASTED International Conference on Antennas, Radar, and Wave Propagation**. 2004.

YONG, Yoke C. **Receive channel architecture and transmission system for digital array radar**. Naval Postgraduate School Monterey CA, 2005.

ZHANG, Haowei *et al.* Dynamic priority scheduling method for the air-defence phased array radar. **IET Radar, Sonar & Navigation**, v. 11, n. 7, p. 1140-1146, 2017.