

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

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
GUERRA ELETRÔNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**COEXISTÊNCIA ENTRE RADARES PHASED ARRAY E EQUIPAMENTOS MAGE  
EM UMA PLATAFORMA NAVAL**



**PRIMEIRO-TENENTE CAIO BRANDÃO GOMES**

Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE CAIO BRANDÃO GOMES

COEXISTÊNCIA ENTRE RADARES PHASED ARRAY E EQUIPAMENTOS MAGE EM  
UMA PLATAFORMA NAVAL

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

Orientadores:

CC (EN) Anderson Silva Soares

Prof.<sup>a</sup> MSc Beatriz Alencar

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE CAIO BRANDÃO GOMES

COEXISTÊNCIA ENTRE RADARES PHASED ARRAY E EQUIPAMENTOS MAGE EM  
UMA PLATAFORMA NAVAL

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

Aprovada em 21 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

CC (EN) Anderson Silva Soares, MSc – CGAEM \_\_\_\_\_

Professora Beatriz Alencar Ribeiro, MSc – CIAA \_\_\_\_\_

Cap Av Denis Queiroz dos Reis – ITA \_\_\_\_\_

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por continuar me acompanhando e me dando forças em mais uma fase da minha carreira e da minha vida acadêmica. Sem dúvida não haveria vitória sem Ele para guiar o caminho.

Aos meus pais que sempre me incentivaram nos estudos e que continuam sempre me apoiando.

Aos professores e orientadores que puderam contribuir para a minha formação acadêmica, transmitindo da melhor forma o conhecimento adquirido durante suas carreiras.

Aos colegas de turma que cumpriram mais esse desafio com grande amizade.

Por fim, a minha noiva, Gêssica Nicolau, pela paciência, pelo companheirismo e pelo apoio para que eu me dedicasse aos estudos, tendo me incentivado todos os dias deste ano.

“É inútil dizer ‘estamos a fazer o possível’. Precisamos de fazer o que é necessário.”

Winston Churchill

# COEXISTÊNCIA ENTRE RADARES PHASED ARRAY E EQUIPAMENTOS MAGE EM UMA PLATAFORMA NAVAL

## Resumo

O atual cenário global e o surgimento de novas ameaças impõe as Forças Armadas em todos os países um elevado grau de preparo e investimento no desenvolvimento tecnológico. Os radares *phased array* e os MAGE são exemplos deste investimento. Estes equipamentos fornecem informações valiosas dentro de uma operação naval e devem operar simultaneamente a bordo de uma mesma plataforma naval. A coexistência de ambos os sensores no uso do espectro eletromagnético é, então, de vital importância para o cumprimento da missão. Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo matemático e aplicá-lo com uma simulação no *software* MATLAB para que possa ser utilizado pela Marinha do Brasil para avaliar a interferência que os radares *phased array*, atuais e futuros, podem causar em seus equipamentos MAGE. Os resultados obtidos das simulações indicam que os radares *phased array* podem causar grandes interferências no MAGE a depender das funções executadas. O emprego de um modelo matemático e de simulações visa permitir melhores projetos de integração para minimizar interferências e permitir a coexistência entre os sistemas. Além disso, é possível motivar a economicidade de recursos ao permitir uma pré-avaliação operacional antes do navio se fazer ao mar.

**Palavras-chave:** Radares *phased array*, AESA, MAGE, compatibilidade eletromagnética, Marinha do Brasil

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Programas estadunidenses de desenvolvimento da tecnologia <i>phased array</i> .....	12
Figura 1.2 – Modelo construído em CAD para um navio com 1200 elementos distribuídos aleatoriamente. Cada indicação em vermelho com “x” indica um elemento radiante .....	13
Figura 1.3 – Sensores da Classe Tamandaré de acordo com o projeto .....	16
Figura 2.1 – Arquitetura de um radar PESA .....	20
Figura 2.2 – Arquitetura de um radar AESA.....	21
Figura 4.1 – Representação da análise proposta.....	27
Figura 4.2 – Modelo do <i>scheduler</i> radar.....	28
Figura 4.3 – Diagrama em blocos do modelo MAGE.....	32
Figura 4.4 – Relação entre a $POI_{PDW,BLK}$ e o trabalho dos radares a bordo da mesma plataforma .....	35
Figura 4.5 – Relação entre a $POI_{PDW,BLK}$ e o trabalho dos radares a bordo da mesma plataforma .....	36
Figura 4.6 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor para diferentes cenários de interferência em função do trabalho dos interferidores .....	36
Figura 4.7 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor para diferentes cenários.....	37
Figura 5.1 – Trabalho de uma função radar em função do trabalho da forma de onda para diferente número de tarefas realizados pelo radar .....	38
Figura 5.2 – Trabalho de um painel do radar em função do trabalho realizado pela execução de uma busca volumétrica .....	40
Figura 5.3 – Trabalho agregado dos painéis de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel para a função de busca volumétrica.....	40
Figura 5.4 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor em função da interferência causada pelo trabalho de um radar a bordo da mesma plataforma realizando busca volumétrica .....	41
Figura 5.5 – Trabalho de um painel do radar em função do trabalho realizado pela execução de uma busca de superfície.....	42
Figura 5.6 – Trabalho agregado dos painéis de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel para a função de busca de superfície .....	42

Figura 5.7 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor em função da interferência causada pelo trabalho de um radar a bordo da mesma plataforma realizando busca de superfície .....	43
Figura 5.8 – Trabalho de um painel do radar em função do trabalho realizado pela execução de iluminação de um alvo.....	43
Figura 5.9 – Trabalho agregado dos painéis de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel para a função de iluminação de alvos.....	44
Figura 5.10 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor em função da interferência causada pelo trabalho de um radar a bordo da mesma plataforma realizando iluminação de alvo .....	45



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variáveis empregadas no modelo do radar.....	29
Tabela 4.2 – Variáveis empregadas no modelo do MAGE.....	32
Tabela 4.3 – Algoritmo para aplicação do modelo matemático em simulação.....	34
Tabela 4.4 – Exemplo de resultado numérico para o modelo .....	37
Tabela 5.1 – Ciclo de trabalho para funções de um radar em emprego naval.....	39
Tabela 5.2 – Dados consolidados da probabilidade do MAGE identificar o emissor com a realização das diversas funções do radar de bordo individualmente.....	46
Tabela 5.3 – Probabilidade de interceptação de um emissor pelo MAGE com o radar RAN-20S operando .....	46

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AESA	<i>Active Electronically Scanned Array</i>
DOA	Direção de Chegada
EUA	Estados Unidos da América
FCN	Fragatas Classe Niterói
FCT	Fragatas Classe Tamandaré
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFM	Medição Instantânea de Frequência
LPI	Baixa Probabilidade de Interceptação
MAGE	Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica
MATLAB	<i>Software</i> de computação numérica da empresa MathWorks
MB	Marinha do Brasil
MIMO	<i>Multiple-input Multiple-output</i>
NAM	Navio-Aeródromo Multipropósito
PDW	Palavra Descritora de Pulso
PESA	<i>Passive Electronically Scanned Array</i>
POI	Probabilidade de Interceptação
PRF	Frequência de Repetição de Pulso
PRI	Intervalo de Repetição de Pulso
PW	Largura de Pulso
TOA	Tempo de Chegada
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Estado da arte</b> .....	13
<b>1.2 Objetivos</b> .....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>1.3 Justificativa e Relevância</b> .....	15
<b>1.4 Organização do Trabalho</b> .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
<b>2.1 Radar <i>Phased Array</i></b> .....	18
<b>2.2 Capacidade multifunção do radar</b> .....	19
<b>2.3 Radares AESA e PESA</b> .....	19
<b>2.4 Radares da MB</b> .....	22
<b>2.5 MAGE</b> .....	23
2.5.1 Receptores .....	23
2.5.2 Intercepção do sinal de um radar AESA.....	24
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	25
<b>3.1 Classificação da Pesquisa</b> .....	25
3.1.1 Quanto aos fins .....	25
3.1.2 Quanto aos meios .....	25
<b>3.2 Limitações do Método</b> .....	25
<b>3.3 Universo e Amostragem</b> .....	25
<b>3.4 Coleta e Tratamento de Dados</b> .....	26
<b>4 MODELO MATEMÁTICO</b> .....	27
<b>4.1 Modelo do <i>Scheduler Radar</i></b> .....	28
4.1.1 Variáveis aplicadas ao modelo .....	28
4.1.2 Equações do modelo do radar.....	30
<b>4.2 Modelo do MAGE</b> .....	31
4.2.1 Variáveis aplicadas ao modelo .....	32
4.2.2 Equações do modelo do MAGE .....	33

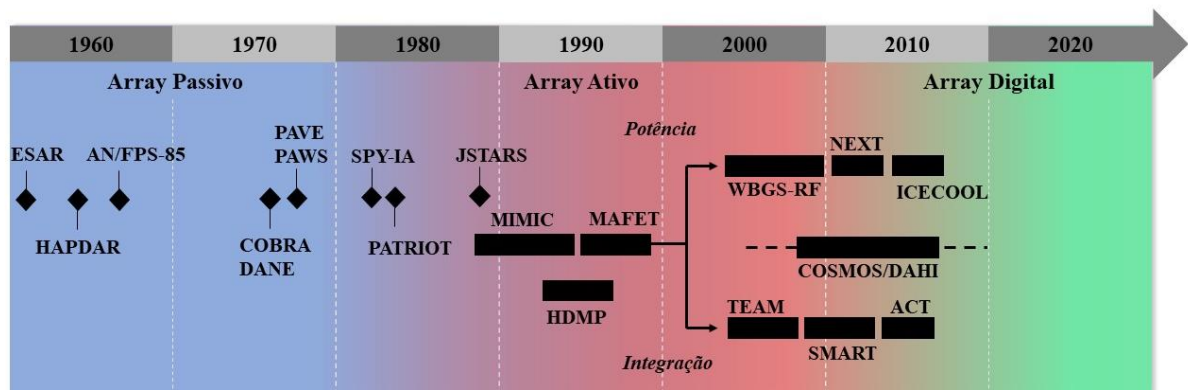
<b>4.3 Validação do modelo .....</b>	<b>34</b>
<b>5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Busca Volumétrica.....</b>	<b>39</b>
<b>5.2 Busca de superfície .....</b>	<b>41</b>
<b>5.3 Iluminação de alvo.....</b>	<b>43</b>
<b>5.4 RAN-20S.....</b>	<b>46</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>6.1 Considerações Finais .....</b>	<b>47</b>
<b>6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o início do emprego militar dos radares e dos equipamentos de guerra eletrônica, o desenvolvimento tecnológico de ambos sempre esteve diretamente relacionado. A evolução da tecnologia nos últimos anos proporcionou um aperfeiçoamento destes dispositivos que trouxe desafios e uma crescente complexidade ao uso do espectro eletromagnético (Barkan; Yehuda, 2012).

Os radares *phased array* passaram por uma grande evolução tecnológica desde a sua concepção, evoluindo conforme descrito por Herd e Conway (2016), dos passivos, para os ativos e aos digitais. A figura 1.1 destaca os projetos desenvolvidos pelos Estados Unidos da América (EUA), desde a década de 1960, para o aperfeiçoamento desses radares, que inclui a evolução dos componentes desses sistemas, sua integração e digitalização, entre outras melhorias que continuam sendo pesquisadas até os dias atuais.

Figura 1.1 – Programas estadunidenses de desenvolvimento da tecnologia *phased array*



Fonte: Adaptado, Herd e Conway (2016)

Este desenvolvimento tecnológico vem associado a outros aspectos históricos. O aumento da globalização gerou maior integração entre nações e fortaleceu o comércio mundial, expandindo o uso do transporte marítimo e trazendo grande importância aos mares e oceanos. Além disso, com o fim da Guerra Fria, o foco das marinhas desviou-se de seus papéis tradicionais nos conflitos entre nações (Berg; Tonnaer, 2014).

Dado esse contexto, as missões das marinhas adaptaram-se, centrando-se agora na guerra assimétrica, combate ao terrorismo, pirataria e tráfico ilegal. Ao mesmo tempo que novos atores emergem, também vem à tona novas ameaças, como os veículos aéreos não tripulados (VANT) e os mísseis antinavio cada vez mais modernos (Berg; Tonnaer, 2014).

Neste contexto de complexidade da guerra moderna, estes sistemas fornecem informações de muito valor que precisam ser garantidas em quaisquer condições. Radares e equipamentos de guerra eletrônica estão continuamente obtendo informações através do uso do

espectro eletromagnético em situação de múltiplos sensores e atores que buscam retirar o mesmo proveito neste ambiente. Sendo assim, aquele que adquire estas informações primeiro e com maior precisão coloca-se em posição vantajosa, por isso, conhecer as capacidades e efetividade dos equipamentos a sua disposição desde a sua criação torna-se de importância significativa (Yurevich, 2020).

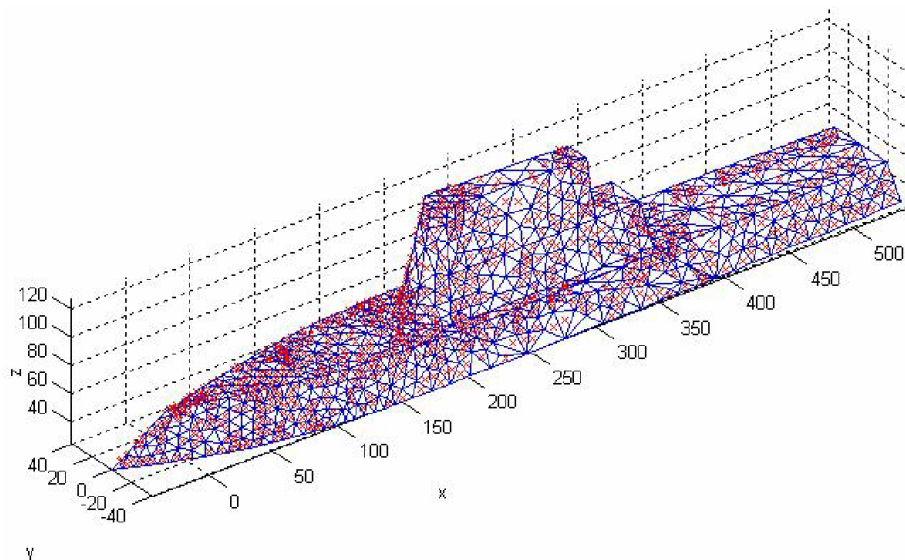
Os navios modernos passaram a ser equipados com essa variedade de sensores que devem operar simultaneamente, garantindo que suas funções se integrem sem prejudicar a operação dos outros. Neste cenário, então, existem radares *phased array* e equipamentos MAGE (Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica) fazendo uso do espectro eletromagnético e operando paralelamente para fornecer informações valiosas e confiáveis.

Portanto, é essencial entender como o comportamento de um sensor afeta o outro desde a fase de projeto, garantindo que sejam integrados harmoniosamente em navios de guerra em benefício da missão.

## 1.1 Estado da arte

Na esfera militar, pesquisadores tem demonstrado interesse em um novo conceito em radares *phased array*, a ideia denominada conjunto oportunista (do inglês *opportunistic array*). Este novo conceito tem por objetivo empregar toda a estrutura de uma plataforma militar, seja um navio, aeronave ou tanque de guerra, como uma antena integrada (Tong, 2005). A figura 1.2 ilustra essa abordagem, apresentando a distribuição aleatória de 1200 elementos radiantes de um conjunto oportunista sobre a superfície de um navio de guerra.

Figura 1.2 – Modelo construído em CAD para um navio com 1200 elementos distribuídos aleatoriamente. Cada indicação em vermelho com “x” indica um elemento radiante



Fonte: Tong (2005)

Sendo assim, uma pesquisa inicial para explorar o assunto relativo a radares *phased array* mostrou que o assunto é amplamente estudado por pesquisadores do mundo todo, possuindo ampla literatura abordando os diversos aspectos destes radares.

Além destes trabalhos, merecem atenção os desenvolvidos pelos Oficiais-Alunos dos Cursos de Aperfeiçoamento Avançado que vem explorando o assunto sob a perspectiva da Guerra Eletrônica e seu emprego pela Marinha do Brasil (MB), podendo citar:

- a) Freitas (2021): Realizou uma análise descritiva e explicativa para apresentar as características e funcionalidades dos radares *phased array*, abordando a importância e os benefícios que este equipamento poderia trazer ao país. Além disso, apresentou alguns dos radares mais empregados no mundo, o cenário atual no Brasil e a importância do desenvolvimento nacional desta tecnologia.
- b) Nascimento (2021): Realizou uma análise expositiva da guerra eletrônica no século XXI, abordando a evolução tecnológica militar na área e focando seu estudo aos navios-escoltas da esquadra brasileira. Desta forma, visa apresentar as características de radares modernos e os atuais sensores embarcados em emprego na MB, o projeto das Fragatas da Classe Tamandaré (FCT) e o radar Artisan, do Navio-Aeródromo Multipropósito (NAM) Atlântico.
- c) Aglio (2022): Realizou um trabalho para apresentar os radares *phased array* de tecnologia AESA (*Active Electronically Scanned Array*), com suas características, funcionalidades e vantagens. Além disso, apresentou os custos preliminares para desenvolvimento deste radar e a aplicação deste radar para as Forças Armadas brasileiras.

## 1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho é avaliar a coexistência de sistemas radares e um sistema MAGE em uma plataforma marítima sob o ponto de vista do uso simultâneo do espectro eletromagnético. Sendo assim, foram traçados os seguintes objetivos geral e específicos, conforme detalhados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um modelo matemático que possibilite analisar a coexistência de um radar AESA e um equipamento MAGE a bordo de um navio de guerra, por meio da avaliação do desempenho do equipamento MAGE na presença de um ou mais radares em funcionamento na mesma plataforma. Espera-se ao final do trabalho aplicar o modelo matemático aos radares *phased array* de relevância para a MB:

- RAN-20S das Fragatas Classe Niterói (FCN);
- Artisan 997 do Navio-Aeródromo Multipropósito Atlântico; e
- TRS-4D das futuras Fragatas da Classe Tamandaré.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para desenvolvimento deste trabalho foram definidos conforme a seguir:

- Realizar pesquisa bibliográfica para verificar o atual desenvolvimento de radares *phased array* e equipamentos MAGE;
- Obter na literatura um modelo matemático que possibilite avaliar a coexistência entre um radar *phased array* e o equipamento MAGE;
- Avaliar e validar o modelo matemático obtido;
- Obter informações dos radares para que possam ser analisados; e
- Desenvolver um algoritmo e realizar simulações com os dados obtidos.

## 1.3 Justificativa e Relevância

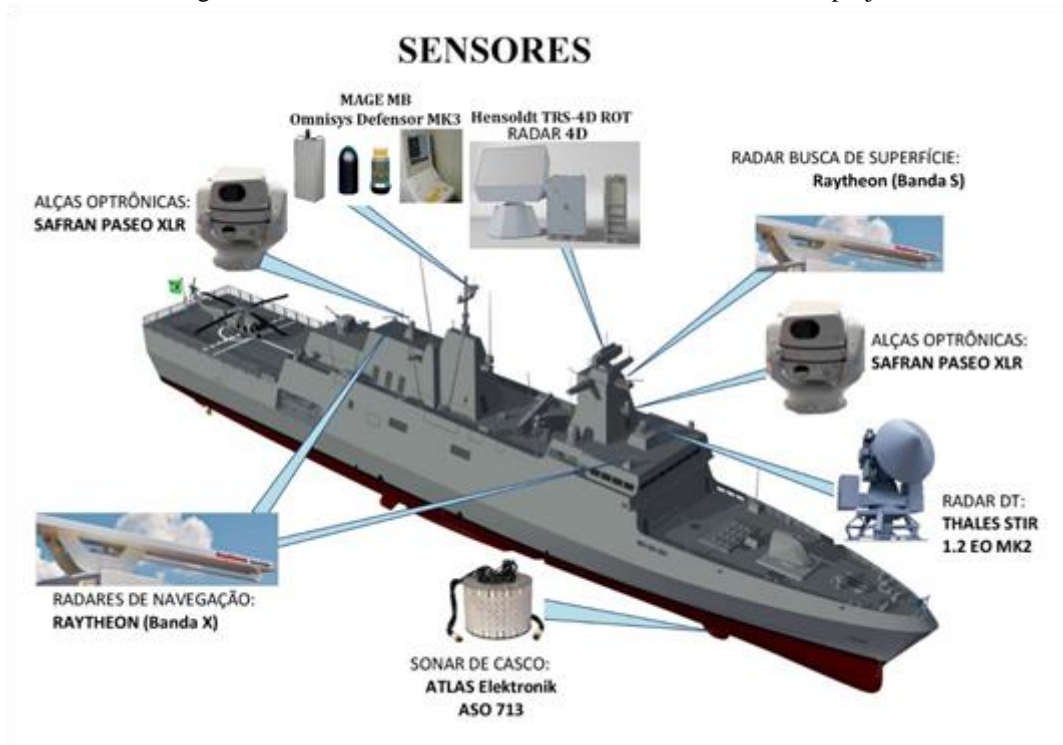
Os radares *phased array* do tipo AESA são equipamentos que performam diversas funções com grande desempenho devido a sua arquitetura e capacidades de controle do feixe transmitido (Castillo-Rubio; Pascual, 2019). Esta propriedade de desempenhar variadas funções com elevada eficiência é uma das características que torna este radar interessante para o emprego em navios de guerra.

Os radares *phased array* são amplamente empregados pelas marinhas de guerra em todo o mundo e a MB está seguindo esta tendência no projeto das FCT, ao desenvolver um navio que será equipado com alguns dos sistemas mais modernos disponíveis no mercado. A figura 1.3 ilustra a configuração dos sensores planejada para este projeto e pode-se destacar a presença do radar TRS-4D, equipado com tecnologia AESA, bem como um equipamento MAGE Defensor Mk III, que coexistirão neste navio.



Os equipamentos MAGE são passivos, medindo os parâmetros dos sinais recebidos por seus receptores. Eles fornecem informações sobre esses sinais e, se disponível em sua biblioteca, podem correlacioná-los com algum sensor ou plataforma (Sharma et al., 2020). Estas propriedades tornam este sensor fundamental para a guerra eletrônica, destacando-se, principalmente, pela sua discrição por não emitir e sua capacidade de identificar outros sensores e plataformas.

Figura 1.3 – Sensores da Classe Tamandaré de acordo com o projeto



Fonte: Junior (2021)

Dessa forma, ambos os sensores são essenciais para um navio de guerra devido às suas aplicações. Assim, garantir a coexistência e a compatibilidade eletromagnética para o funcionamento concomitante tornam-se fundamentais para assegurar mínima interferência entre os sistemas, de forma que possam operar em harmonia e para que nenhuma informação fornecida seja perdida.

Além de proporcionar a análise da coexistência de ambos os sistemas, um modelo matemático é de grande relevância do ponto de vista econômico. A utilização de um modelo pode proporcionar uma pré-avaliação operacional dos sistemas antes do navio se fazer ao mar. Dessa forma, os custos com combustível, pessoal, mantimentos e outros poderiam ser reduzidos, tendo em vista que seria necessária uma análise de menores proporções para garantir seu correto funcionamento quando o navio se fizesse ao mar.

## 1.4 Organização do Trabalho

O capítulo 2 apresenta as características, o funcionamento e as capacidades dos radares *phased array* e dos equipamentos MAGE, incluindo os radares da MB que fazem parte do objeto de estudo deste trabalho.

O capítulo 3 explica a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho e para aplicação do modelo matemático com o emprego do *software* MATLAB.

O capítulo 4 apresenta o modelo matemático usado para analisar a coexistência de radares *phased array* e equipamentos MAGE utilizados a bordo de uma mesma plataforma.

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos, a fim de averiguar a forma como ocorre a coexistência dos sistemas MAGE e radares a bordo de um navio de guerra.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho, mostrando sua aplicação na MB e possibilidades futuras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada uma abordagem conceitual do funcionamento do radar *phased array*, sua capacidade de realizar múltiplas funções, a diferença entre os radares do tipo PESA (*passive electronically scanned array*) e AESA, algumas características dos radares da MB e o funcionamento de um equipamento MAGE.

Desta forma foram utilizados livros e artigos de autores de referência no assunto como Merril Skolnik e Robert Mailloux, membros da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), com livros e diversos artigos publicados sobre o tema de radares. Outros artigos publicados na IEEE foram utilizados como referência neste capítulo de membros da organização com experiência na área, podendo citar Salvador Talisa, Jeffrey Herd, M. David Conway e Alfonso Farina.

### 2.1 Radar *Phased Array*

As antenas *phased array* consistem em múltiplos elementos de antena estacionários, que são alimentados de forma coerente e usam fase variável ou controle de atraso de tempo em cada elemento para digitalizar o feixe transmitido para determinados direções no espaço. Ainda é possível também o controle de amplitude variável para determinar o padrão de irradiação. Essa multiplicidade de elementos permite um controle mais preciso do padrão de radiação, resultando assim também em lóbulos laterais menores ou padrão de irradiação da antena precisamente gerados para se adequar a situação (Mailloux, 2018).

De acordo com Skolnik (2008) algumas das capacidades dos radares *phased array* são: alternar feixes com precisão e rapidez de forma eletrônica que o proporciona uma alta flexibilidade para realizar múltiplas funções; alterar a largura do feixe para realizar busca em áreas específicas mais rapidamente e com menos ganho; agilidade de frequência com possibilidade de alteração pulso a pulso; e codificação dos pulsos transmitidos.

Desta forma, esse radar pode rastrear diversos alvos, realizar busca com seleção automática de alvos e transferência para rastreamento, iluminar vários alvos e guiar armamentos até esses alvos. As taxas com que essas tarefas são realizadas podem ser ajustadas para melhor atender a situações particulares, limitadas apenas pelo uso total do tempo e recursos do radar.

## 2.2 Capacidade multifunção do radar

Um radar naval possui capacidade de realizar múltiplas funções simultaneamente, incluindo rastreamento, vigilância, controle de armamento e várias outras funções (Labreuche et al., 2017).

A execução de múltiplas funções exige do radar o gerenciamento dos recursos para considerar a priorização e o formato dos feixes para melhor atender a tarefa desejada. O *scheduler* do radar é o responsável por realizar a seleção e otimização dos recursos do radar, controlando ativamente a energia necessária, o tempo e a formação do feixe para executar cada uma das tarefas (Ding; Moo, 2017).

De acordo com Ding e Moo (2017) são três os principais recursos do radar. O primeiro deles é o recurso de tempo que deverá ser distribuído entre todas as tarefas e é limitado pelo caráter tático do ambiente em que a plataforma se encontra. O segundo é a energia, limitada pela fonte de alimentação e pela capacidade de refrigeração do sistema. E por último a capacidade de processamento de todas as entradas.

O *scheduler* do radar ainda pode levar em consideração outros fatores secundários, incluindo feixes de radar, tempo de permanência sobre o alvo, frequência portadora, frequência de repetição de pulso (PRF) e energia transmitida.

Normalmente existem diversas tarefas associadas a cada função de radar. Todas as funções e as tarefas de função são coordenadas pelo *scheduler* que otimiza a alocação dos recursos com base no gasto que cada função custa aos recursos do radar. O *scheduler* também é responsável por degradar tarefas consideradas de menor prioridade quando os recursos não são suficientes (Ding; Moo, 2017).

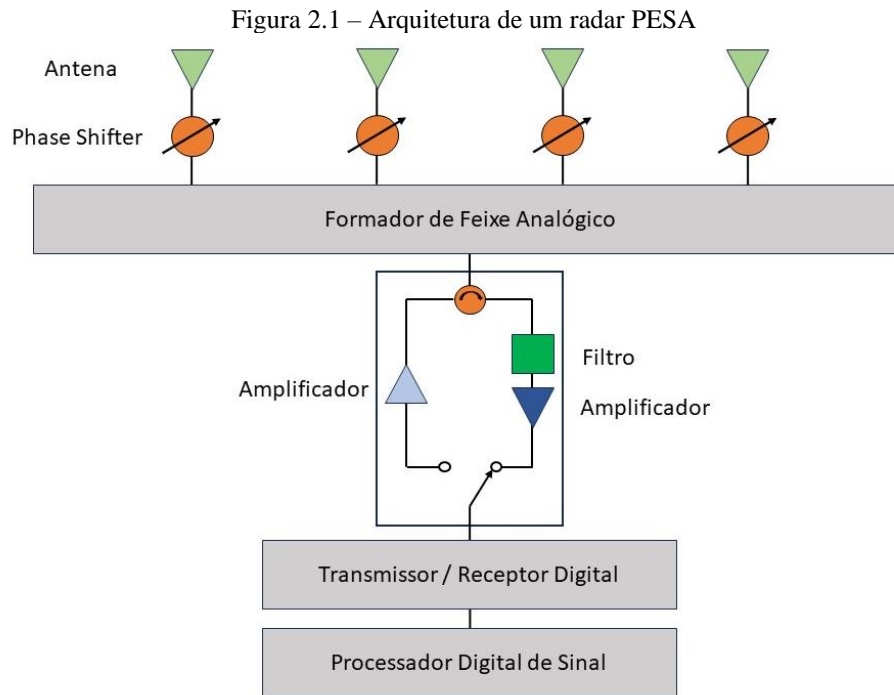
A alocação dos recursos disponíveis ocorre, segundo Ding e Moo (2017), seguindo as seguintes etapas:

- Um perfil de missão do radar ou configuração de função é obtido;
- As tarefas do radar são geradas;
- Utilizando um algoritmo de priorização são atribuídas prioridades as tarefas; e
- Os recursos são disponibilizados e um algoritmo de agendamento determina o momento de execução de cada uma das tarefas.

## 2.3 Radares AESA e PESA

Os radares de matriz de varredura eletrônica passiva, PESA, são radares *phased array* que possuem um elemento único de transmissão e recepção para todas as antenas do

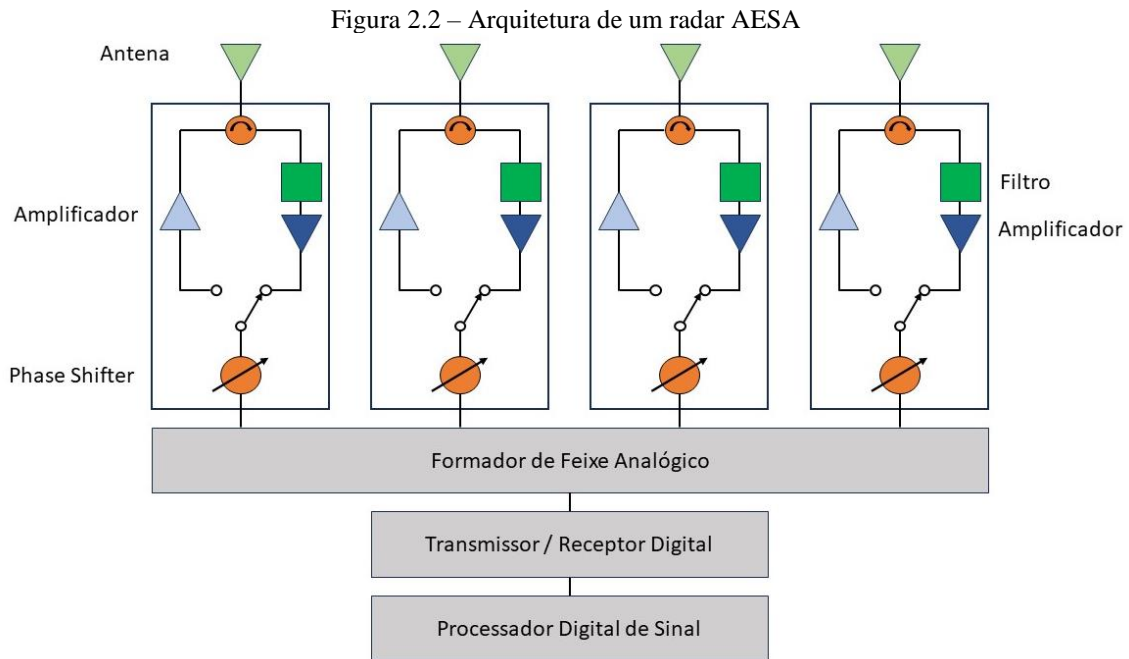
conjunto. A figura 2.1 mostra a arquitetura de um radar PESA, no qual o módulo formador do feixe e os *phase shifters* que direcionam os feixes se encontram entre o módulo único de amplificação de transmissão e recepção e as antenas. Esse único módulo tem que ser capaz de fornecer alta potência de transmissão para fornecer energia suficiente para todas as antenas do conjunto do radar (Herd; Conway, 2016).



Fonte: Herd e Conway (2016)

Esses radares apresentam grandes vantagens em relação aos radares tradicionais com antenas rotativas, fornecendo agilidade do feixe transmitido e altas taxas de atualização de busca e rastreamento (TALISA et al., 2016). Ainda assim apresenta algumas vulnerabilidades como destacado por Herd e Conway (2016) como um único transmissor centralizado para todas as antenas, as redes formadoras de feixe de difícil integração em plataformas de menores dimensões e as perdas ocorridas após a amplificação no transmissor antes da emissão efetiva da onda eletromagnética pela antena ao passar pelos formadores de feixes e pelos *phase shifters*.

A evolução tecnológica em busca de superar as falhas dos radares PESA levou ao desenvolvimento dos radares AESA. A figura 2.2 mostra a arquitetura de um radar AESA e como os amplificadores de transmissão e recepção estão conectados diretamente a cada uma das antenas. Essa mudança na arquitetura permite menos perdas após os amplificadores e a não dependência de um amplificador único para fornecer para todas as antenas a energia de alta potência necessária. Adicionalmente, eventuais falhas causam perdas muito baixas no desempenho total do radar ao afetarem apenas os elementos aos quais estão ligados (Herd; Conway, 2016).



As principais características dos radares *phased array* são sua alta confiabilidade devido ao descrito anteriormente a respeito dos módulos independentes para cada antena; a capacidade multifuncional, realizando mais de uma tarefa por vez; e baixa probabilidade de interceptação (POI), pelo uso do direcionamento do feixe, pela redução dos lóbulos laterais, das mudanças aleatórias nas frequências utilizadas e no intervalo de repetição de pulso (PRI) variável (Mishra, 2018).

Além, das possibilidades do radar proverem um melhor emprego dos recursos para o desempenho de suas funções, suas características também o tornam mais resistentes a interferências propositas que tentem ser utilizadas pelo inimigo (Mishra, 2018).

Entre as tarefas que podem ser realizadas por um radar AESA temos: busca de alvos, rastreamento de múltiplos alvos, orientação de mísseis, monitoramento ambiental, bloqueio ativo e funções auxiliares. Cada tarefa é caracterizada por sua prioridade específica que é uma medida de quão importante é comparado com os outros (Sgambato et al., 2015).

De acordo com Herd e Conway (2016) os radares PESA são usados em um número de sistemas de radar militares significativos dos EUA, incluindo o radar *phased array* Aegis de banda S desenvolvido para o Marinha dos EUA pela RCA e o radar Patriot de banda C desenvolvido para o Exército dos EUA pela Raytheon. Bem como, os radares AESA com grande emprego tanto militar quanto civil, incluindo o radar terrestre *Theater High Altitude Area Defense* (THAAD), o radar naval SPY-3 e em telecomunicações nos satélites Iridium.

A MB possui 2 radares com tecnologia *phased array*, sendo o RAN-20S das FCN um *phased array* do tipo PESA e o Artisan 3D do NAM Atlântico um radar AESA. Além desses

radares é previsto pelo projeto das FCT, de acordo com Junior (2021), a instalação do radar TRS-4D, um radar AESA da empresa alemã HENSOLDT.

## 2.4 Radares da MB

Os radares representam equipamentos vitais dentro de um navio de guerra. Dessa forma, o acesso a informações desses sistemas são bastante restritas, sendo apenas do conhecimento dos fabricantes e das marinhas que os operam. Este trabalho apresenta algumas informações de características e capacidades do RAN-20S, do Artisan 997 e do TRS-4D.

O primeiro deles, o radar RAN-20S, da empresa italiana Alenia está presente nas Fragatas da Classe Niterói. O radar de busca combinada, opera na banda S e possui uma antena do tipo *planar array*. As principais características deste radar são a capacidade de detecção de alvos do tamanho de um caça a 60 milhas náuticas, com uma precisão de distância de 20m e angular de 0,3°; agilidade de frequência; e a presença de filtragem MTI (Galante, 2018). Além disso o radar é de tecnologia PESA com uma antena rotativa do tipo planar array e possui um alcance de 120km (Freitas, 2021).

O Artisan é um radar definido por *software* amplamente empregado na Marinha Real Britânica. As principais funções do radar são: vigilância aérea e designação de alvos a médio alcance e controle de tráfego aéreo e de aproximação. O radar é capaz de detectar objetos tão pequenos quanto uma bola de tênis que estejam em uma velocidade de três vezes a velocidade do som a mais de 25 km de distância. Além disso, pode acompanhar mais de 900 objetos simultaneamente até 200km (BAE Systems, 2023).

O radar TRS-4D é um radar da banda C desenvolvido a partir de uma evolução dos radares navais TRS-3D, possuindo uma versão rotativa e outra de painéis fixos (Hensoldt, 2023a). As principais capacidades funcionais do radar são: busca aérea 3D, vigilância de superfície, busca orientada, acompanhamento prioritário de alvos, classificação de alvos, controle de tráfego aéreo e de aproximação para helicópteros, IFF integrado, integração integrada em rede de múltiplas plataformas, direção de tiro e detecção, acompanhamento e supressão de bloqueios (Schikorr et al, 2014).

O radar foi projetado para uma ampla flexibilidade na geração de formas de onda e processamento de sinais. Todas as funções de radar são executadas simultaneamente sem alternar entre os modos de radar (Schikorr et al, 2016). As principais características desse radar são os módulos de transmissão e recepção baseados na tecnologia de nitreto de gálio (GaN) e a arquitetura para varredura eletrônica, conformação digital do feixe, a operação de múltiplos feixes na recepção e a separação de ondas interligadas para alvos aéreos e de superfície (Bil;

Holpp, 2015). Além disso, possui um alcance de mais de 250km e a capacidade de acompanhar mais de 1.000 alvos simultaneamente (Hensoldt, 2023b).

## 2.5 MAGE

O equipamento MAGE é responsável por reconstruir quase em tempo real uma imagem do cenário eletromagnético ao seu redor visando prover vigilância passiva de uma aérea e proporcionar autodefesa ao possibilitar a detecção da presença de plataforma inimiga. Esses equipamentos podem estar embarcados em plataformas navais ou aéreas a fim de cumprir seu propósito, sendo possível obter a posição das ameaças a partir da triangulação dos sinais interceptados (Neri, 2018).

O receptor capta diversos sinais em um amplo espectro de frequência, que, devido às suas distintas características, devem ser processados e categorizados para extração de informações relevantes do cenário em questão. A cada pulso recebido pelos receptores, o equipamento realiza medições fundamentais desses sinais: da frequência, da largura de pulso (PW), amplitude e tempo de chegada (TOA). Durante o processamento do sinal são extraídos o PRI e o ângulo de chegada (DOA). Todas essas informações são agrupadas e registradas nas palavras descritoras de pulso (PDW) (Robertson, 2019).

Após definir a PDW, inicia-se o processo de *deinterleaving*, agrupando os pulsos com base em parâmetros similares. Dessa forma, o MAGE é capaz de identificar as características de um sinal e apresentar ao operador as informações das interceptações e se houver uma biblioteca disponível, realiza a comparação e identifica um emissor catalogado (Neri, 2018).

### 2.5.1 Receptores

De acordo com Robertson (2019), os principais tipos de receptores para um equipamento MAGE são: super-heteródinos, de cristal vídeo, de medição instantânea de frequência (IFM) e canalizados. A seleção do receptor mais adequado dependerá da faixa de frequência e da sensibilidade requeridas para o MAGE.

Os equipamentos MAGE presentes nas Fragatas Classe Niterói e Classe Tamandaré utilizam receptores IFM. As principais vantagens desses receptores são sua ampla largura de banda e capacidade medir com precisão a frequência do sinal interceptado e sua principal limitação é sua capacidade de medir apenas um sinal de cada vez (Robertson, 2019).



### 2.5.2 Intercepção do sinal de um radar AESA

Os radares de baixa probabilidade de interceptação (LPI) usam técnicas como agilidade de frequência, PRI variável, modulação de potência e múltiplos feixes de transmissão para dificultar o *deinterleaving* pelo MAGE que não recebe pulsos aos quais consegue identificar um padrão (Robertson, 2019).

Desta forma, os equipamentos MAGE têm dificuldade considerável em realizar o *deinterleaving* dos pulsos para um único radar AESA devido à ampla gama de frequências utilizadas e ao aparentemente aleatório perfil de amplitude de pulso para o radar. Além disso, o equipamento consegue apenas registrar uma pequena fração dos pulsos transmitidos, já que com o direcionamento de feixe nem todos são recebidos (Robertson, 2019).

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo descreve as classificações da pesquisa abordada neste trabalho e os métodos utilizados para coleta e tratamento dos dados.

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

Considerando os possíveis enquadramentos, a pesquisa pode ser classificada de acordo com os seguintes critérios:

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

A pesquisa pode ser definida como exploratória que, de acordo com Gil (2017), “têm como propósito proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses”. Além disso, a pesquisa pode ser categorizada como descritiva, visto que “tem como objetivo a descrição das características de determinada população ou fenômeno” (Gil, 2017).

##### **3.1.2 Quanto aos meios**

O trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica que de acordo com Gil (2017) consiste na realização do levantamento de informações em material publicado. Por meio desta pesquisa foi possível obter o modelo matemático empregado para simulação. Além disso, a pesquisa pode ser classificada como experimental, uma vez que envolve a manipulação das entradas do modelo matemático para entender como isso afetaria os radares da MB, servindo como objeto de estudo.

#### **3.2 Limitações do Método**

A pesquisa bibliográfica restringiu-se a fontes de informação de caráter aberto. Isso ocasionou dificuldades em obter informações técnicas específicas sobre os parâmetros dos radares pretendidos para testes no modelo matemático. Tais informações, geralmente presentes em manuais técnicos, não são disponibilizadas pelos fabricantes ou proprietários dos equipamentos, dada a relevância destes radares e suas tecnologias.

#### **3.3 Universo e Amostragem**

O universo de amostragem são os radares *phased array* e os equipamentos MAGE, com o objetivo de estudar a coexistência de ambos em uma mesma plataforma. O estudo foi

limitado aos radares *phased array* dos tipos PESA e AESA, empregados pela MB, e aos equipamentos MAGE abordando um receptor na sua forma mais genérica.

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

A pesquisa bibliográfica foi baseada em livros e artigos científicos de autores e editoras consagrados no meio acadêmico, com ênfase aos artigos publicados por membros renomados da IEEE como Merrill Skolnik, M. David Conway e Jeffrey S. Herd e Alfonso Farina. Este último é coautor do artigo que propôs o modelo matemático que é empregado neste trabalho.

Adicionalmente, foi empregado o sistema computacional MATLAB para gerar os resultados deste trabalho com base no modelo matemático de Celentano et al. (2020) para avaliar a coexistência de radares *phased array* e equipamentos MAGE de forma a ser empregado pela MB em avaliações de desempenho e projetos de navios futuros.

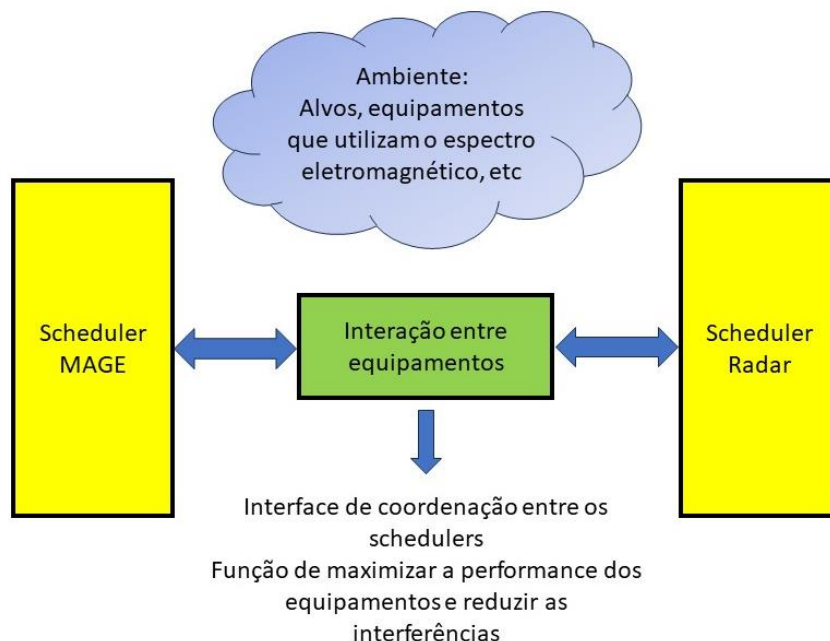
## 4 MODELO MATEMÁTICO

Os navios são projetados com a instalação de diversos equipamentos, que fazem uso do espectro eletromagnético para vigilância, comunicação e defesa, com a missão de cumprirem tarefas cada vez mais complexas. Todos esses equipamentos tornam o ambiente eletromagnético mais saturado e complexo, o que poderá afetar e entrega adequada de informações recebidas ou adquiridas por esses sistemas. Dessa forma, compreender a situação eletromagnética é crítica para analisar interferências (Wang et al., 2015).

Sendo assim, tem-se a proposta de Celentano et. al (2020) de analisar coexistência de radares *phased array* e equipamentos MAGE a bordo de uma mesma plataforma. O objetivo era validar o projeto de posicionamento desses sensores nos mastros de um navio através da análise da performance do MAGE. Dessa forma, o modelo matemático foi concebido a fim de analisar a probabilidade de interceptação de um sinal pelo MAGE na presença de diversos sinais transmitidos pelo próprio navio, em especial os sistemas radares, para que ambos pudessem cumprir seus objetivos de concepção.

O cenário avaliado, apresentado na figura 4.1, considera como ambiente os emissores nos arredores do navio, o “*Scheduler RADAR*” é o responsável pelo controle dos recursos do radar para execução das suas funções e o “*Scheduler MAGE*” é a representação do modelo do MAGE como função do ambiente e do comportamento do radar. A saída da modelagem do *scheduler radar* é a entrada do modelo do MAGE para avaliar a interferência do sinal transmitido pelo radar.

Figura 4.1 – Representação da análise proposta



Fonte: Celentano et. al (2020)

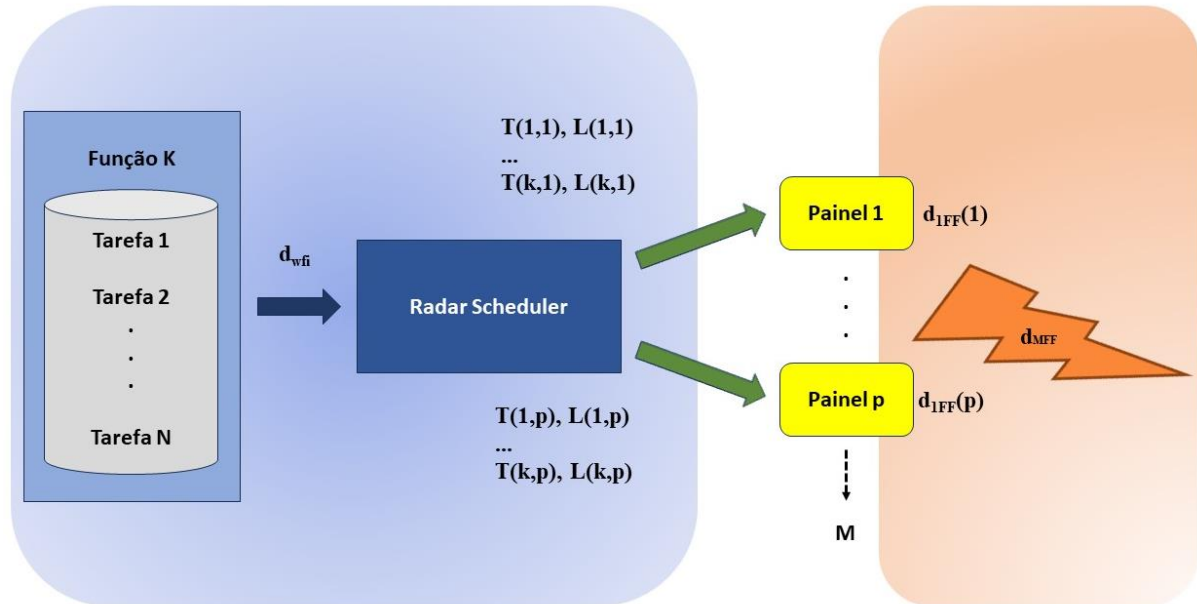
## 4.1 Modelo do *Scheduler* Radar

O desenvolvimento do radar *phased array* tornou possível que o feixe radar fosse moldado e direcionado rapidamente de uma direção para outra no espaço sem a necessidade de uma movimentação da antena. Um recurso computacional foi adicionado ao radar para poder avaliar as disponibilidades de recursos e definir quando e onde cada feixe seria direcionado. Sendo assim, o *scheduler* radar atua como um gestor de tarefas do radar, alocando precisamente os recursos disponíveis dos elementos para que cada função do radar seja executada em um tempo e objetivo estipulado.

O modelo proposto por Celentano et. al (2020) considera o funcionamento do radar AESA a partir do seu ciclo de trabalho, a razão entre o tempo de transmissão e o tempo de escuta do radar. Assim, para cada função do radar (busca, acompanhamento de alvos, direção de tiro) se pode determinar um modelo baseado no trabalho correspondente a sua forma de onda.

A figura 4.2 representa o *scheduler* radar simulado e sua interação para administrar os recursos do radar para executar as diferentes tarefas de uma determinada função.

Figura 4.2 – Modelo do *scheduler* radar



Fonte: Celentano et. al (2020)

### 4.1.1 Variáveis aplicadas ao modelo

O modelo simplifica os parâmetros operacionais em variáveis que refletem o funcionamento do *scheduler* de um radar *phased array*, conforme as informações sob seu controle. A tabela 4.1 apresenta um resumo dessas variáveis.

Tabela 4.1 – Variáveis empregadas no modelo do radar

Variável	Emprego
<b>M</b>	Número de painéis da antena
<b>N<sub>Func</sub></b>	Número de funções/atividades solicitadas ao radar
<b>N<sub>task(k,p)</sub></b>	Número de tarefas da k-ésima função do p-ésimo painel
<b>d<sub>wfi</sub></b>	Trabalho de transmissão da i-ésima forma de onda da k-ésima função do p-ésimo painel
<b>L(k,p)</b>	Tempo disponibilizado para a k-ésima função do p-ésimo painel
<b>T(k,p)</b>	Tempo de renovação da k-ésima função do p-ésimo painel
<b>d<sub>TX<sub>k</sub></sub></b>	Trabalho de uma função do painel
<b>d<sub>1FF(p)</sub></b>	Trabalho de transmissão do p-ésimo painel
<b>d<sub>MF</sub></b>	Trabalho de transmissão agregado dos M painéis

Fonte: Próprio autor

Uma explicação mais detalhada das variáveis do modelo é apresentada a seguir.

- a) Um radar *phased array* pode possuir uma antena ou um conjunto de antenas fixas com mais de um painel, normalmente, 3 ou 4 painéis. A variável “M” representa essa possibilidade de pluralidade de painéis.
- b) Um radar AESA pode desempenhar várias funções, como busca volumétrica, acompanhamento ou designação de alvos. A variável “N<sub>Func</sub>” representa o número de funções que o radar desempenha.
- c) Uma tarefa é uma ação específica que o radar executará para cumprir com um objetivo relacionado a uma das funções que desempenha. Um exemplo para o acompanhamento de alvos, se o radar possui dois alvos para acompanhar, nesse momento, teria duas tarefas. A variável “N<sub>task(k,p)</sub>” representa esse número de tarefas para uma determinada função sendo realizada por um dos painéis.
- d) O ciclo de trabalho (do inglês *duty cycle*) é o período em que o radar está transmitindo em relação ao tempo de operação definido em porcentagem, sendo a relação entre a largura de pulso e a frequência de repetição de pulsos. A variável “d<sub>wfi</sub>” representa este trabalho para uma forma de onda de uma função de um painel.
- e) O *scheduler* radar é responsável por determinar o tempo alocado para o radar executar cada uma das suas funções. A variável “L(k,p)” representa esse tempo para cada uma das funções de um painel.

- f) O trabalho de um painel é o somatório do trabalho de todas as ondas para realizar as tarefas de uma determinada função em função do número de tarefas a serem realizadas;
- g) Após a execução de uma determinada função pelo radar ocorrerá um intervalo de tempo até que o *scheduler* determine a execução desta mesma tarefa pelo radar novamente. A variável “ $T(k,p)$ ” representa esse tempo para que uma determinada função seja executada pelo mesmo painel.
- h) A variável “ $d_{IFF}(p)$ ” representa o mesmo conceito apresentado anteriormente de trabalho de transmissão com a diferença que agrega o trabalho de todas as funções que forem executadas pelo radar.
- i) A variável “ $d_{MFF}$ ” aglutina o trabalho de transmissão de todos os painéis do radar.

#### 4.1.2 Equações do modelo do radar

As variáveis apresentadas anteriormente serão utilizadas nas equações matemáticas do modelo proposto por Celentano et al. (2020). Essas equações serão apresentadas a seguir.

O trabalho de transmissão de uma determinada função é o somatório do trabalho de transmissão de todas as formas de onda de uma função do radar para um painel em relação ao número de tarefas executadas pelo radar, representada pela equação 4.1.

$$d_{TX_k} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{task(k,p)}} d_{wfi}}{N_{task(k,p)}} \quad (4.1)$$

O trabalho de transmissão para um determinado painel é o somatório, de acordo com o número de funções executadas pelo radar, do produto do trabalho de transmissão de uma função, apresentado na equação 4.1, pelo tempo de execução desta função. A equação 4.2 apresenta este trabalho.

$$d_{1FF}(p) = \sum_{K=1}^{N_{Func}} L(k,p) \cdot d_{TX_k} \quad (4.2)$$

O trabalho de transmissão para todos os painéis do radar é representado pela equação 4.3, em que temos o trabalho agregado em função do produtório em relação aos trabalhos individuais de cada um dos painéis.

$$d_{MFF} = \prod_{p=1}^M (1 - d_{1FF}(p)) \quad (4.3)$$

No caso de painéis individuais realizando suas tarefas com homogeneidade, a equação 4.3 pode ser simplificada para a equação 4.4.

$$d_{MFF} = 1 - (1 - d_{1FF}(p))^M \quad (4.4)$$

## 4.2 Modelo do MAGE

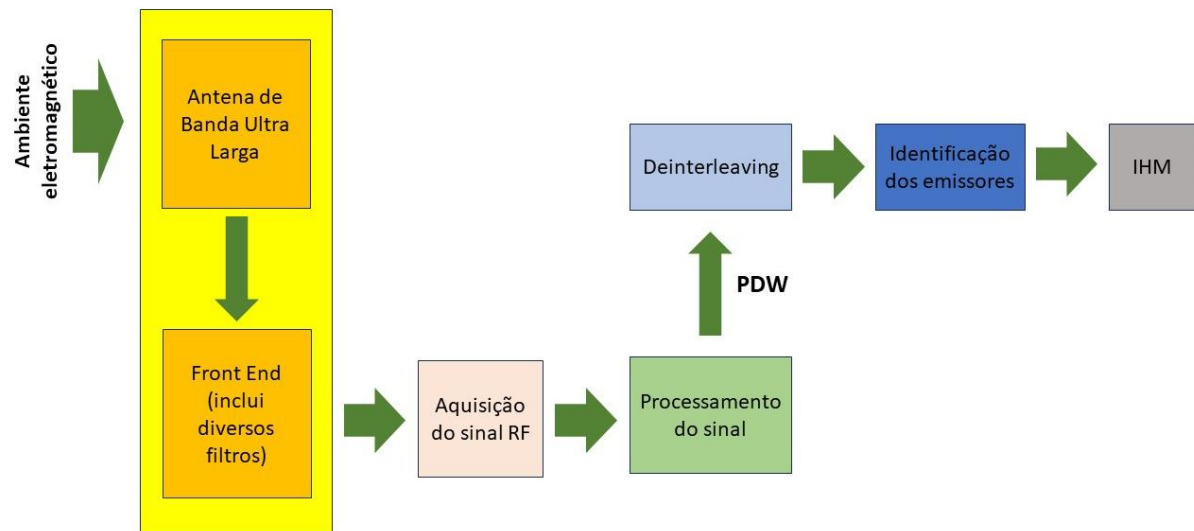
O sensor modelado por Celentano et. al (2020) foi um equipamento com antena de banda ultra larga capaz de processar os sinais recebidos e extrair a PDW. E com a capacidade realizar o *deinterleaving* com a utilização de qualquer algoritmo, determinando todas as informações dos sinais interceptados.

Nesse ambiente complexo em que o equipamento MAGE trabalha, ele recebe sinais inclusive dos sensores da plataforma. Assim sendo, normalmente, esses sensores informam em tempo real ao MAGE os sinais que estão transmitindo para que ele possa gerenciá-los de uma das seguintes formas: desligar temporariamente o receptor, fechar alguns filtros na antena, gerenciar o processamento do sinal no domínio do tempo ou no domínio da frequência, produzir uma PDW do sinal e identificar e armazenar essa informação como de um sensor de bordo e monitorar com recursos do sistema as bandas de frequência mais densas. Em um cenário real é possível que uma combinação das estratégias mencionadas anteriormente seja necessária e isto pode causar uma redução na performance do sistema.

A figura 4.3 representa o diagramas em bloco do equipamento MAGE considerado para estudo, com uma antena de banda larga para recepção dos sinais, seguida do *front-end* da antena com seus respectivos filtros, o bloco de aquisição dos sinais que os encaminha para o processador que forma a PDW e encaminha para o *deinterleaving*, para separar os dados de cada sinal e produzir os “*tracks*”, separação das informações por equipamento ou plataforma se disponível em biblioteca, e fornecer essas informações ao operador.



Figura 4.3 – Diagrama em blocos do modelo MAGE



Fonte: Celentano et. al (2020)

#### 4.2.1 Variáveis aplicadas ao modelo

Algumas variáveis adicionais são necessárias a continuação do modelo proposto para a descrição do MAGE. A tabela 4.2 apresenta um resumo dessas variáveis.

Tabela 4.2 – Variáveis empregadas no modelo do MAGE

Variável	Emprego
<b>N</b>	Número de radares a bordo
<b>d<sub>i</sub></b>	Ciclo de trabalho do radar
<b>POI<sub>PDW</sub></b>	Probabilidade do MAGE conseguir uma PDW do sinal interceptado
<b>POI<sub>PDW,BLK</sub></b>	Probabilidade do MAGE conseguir uma PDW do sinal interceptado na presença de emissores a bordo transmitindo
<b>POI<sub>emitter</sub></b>	Probabilidade do MAGE realizar <i>deinterleaving</i> do sinal obtido
<b>β</b>	Coefficiente representativo das características do radar cujo sinal é interceptado pelo MAGE
<b>d<sub>MFF</sub></b>	Trabalho de transmissão agregado dos M painéis do radar

Fonte: Próprio autor

Uma explicação mais detalhada das variáveis do modelo é apresentada a seguir.

- A variável “N” representa o número de radares, a bordo da mesma plataforma, operando com sinais que possam interferir no MAGE.
- A variável “d<sub>i</sub>” representa o ciclo de trabalho do radar que transmite o sinal que interfere no MAGE.

- c) A variável “ $POI_{PDW}$ ” descreve a probabilidade de interceptação do sinal considerando a probabilidade de o sistema conseguir produzir uma PDW após o processamento do sinal recebido. Para este trabalho foi assumido como aproximadamente 1 considerando que o MAGE opera com uma boa relação sinal ruído (SNR).
- d) A variável “ $POI_{PDW,BLK}$ ” descreve probabilidade de interceptação do sinal considerando a probabilidade de o sistema conseguir produzir uma PDW considerando a presença da interferência pelo sinal transmitido por um sensor a bordo.
- e) A variável “ $POI_{emitter}$ ” é a probabilidade de obter informações do emissor após o *deinterleaving*. Relaciona-se com a probabilidade de o equipamento produzir uma PDW que possa ser utilizada no *deinterleaving*.
- f) A variável “ $\beta$ ” é um coeficiente dependente das características do emissor a ser interceptado.
- g) A variável “ $d_{MFF}$ ” é trabalho de transmissão agregado dos M painéis do radar, obtido a partir do modelo radar apresentado anteriormente.

#### 4.2.2 Equações do modelo do MAGE

As variáveis apresentadas anteriormente serão utilizadas nas equações matemáticas do modelo proposto por Celentano et al. (2020) para o MAGE. Essas equações serão apresentadas a seguir.

A probabilidade de um sinal recebido pelas antenas receptoras MAGE produzirem uma PDW foi estabelecida para uma alta SNR em valor aproximado de 100%. A equação 4.5 apresenta a probabilidade do equipamento MAGE em gerar uma PDW, estando sob interferência de um sinal produzido por um radar instalado a bordo da mesma plataforma.

$$POI_{PDW,BLK} = POI_{PDW} \cdot (1 - d_1) \quad (4.5)$$

Na presença de mais de um radar transmitindo sinais que possam interferir no desempenho do equipamento MAGE, a equação 4.5 é aproximada para a equação 4.6 em função do número de radares interferidores.

$$POI_{PDW,BLK} = POI_{PDW} \prod_{i=1}^N (1 - d_i) \quad (4.6)$$

Se os radares possuírem o mesmo ciclo de trabalho, essa probabilidade de produzir uma PDW com a interferência de um sinal radar é simplificada para a equação 4.7.

$$POI_{PDW,BLK} = POI_{PDW} \cdot (1 - d)^N \quad (4.7)$$

A aplicação desse modelo para um cenário operacional possibilitou a Celentano et. al (2020) a consolidação da equação 4.8 para a probabilidade de *deinterleaving* do sinal interceptado mesmo na presença de um sensor, a bordo da mesma plataforma, interferindo na recepção do MAGE.

$$POI_{emitter} = POI_{PDW} \cdot (1 - d_{MFF})^{\beta \cdot d_{MFF}} \quad (4.8)$$

Pela avaliação do cenário operacional, o coeficiente  $\beta$  foi estabelecido em 1,5 para o melhor cenário e 6,5 para o pior cenário.

### 4.3 Validação do modelo

Esse capítulo tem por objetivo validar o método proposto. Dessa forma, foi utilizado o seguinte algoritmo para reproduzir os resultados obtidos por Celentano et. al. (2020):

Tabela 4.3 – Algoritmo para aplicação do modelo matemático em simulação

#### Início

- 1: **Entradas** {Número de tarefas, Número de funções, Número de painéis, ciclo de trabalho}
- 2: **Valores iniciais** POI =1
- 3: **Calcular** o ciclo de trabalho para uma função
- 4: **Calcular** o ciclo de trabalho para um painel
- 5: **Calcular** o ciclo de trabalho para M painéis
- 6: **Calcular** probabilidade de produzir PDW com sinais de interferência para N radares
- 7: **Enquanto**  $N \leq 4$
- 8: **Calcular** valor POI do MAGE com interferência para ciclo de trabalho de 1 a 100%
- 9: **Fim**
- 10: **Criar gráfico** para POI do MAGE com sinais de interferência para N radares
- 11: **Para** trabalho dos radares de 1 a 100%

- 12: **Calcular** POI do MAGE com interferência e considerando os valores de aproximação para características dos emissores interceptados
- 13: **Fim**
- 14: Criar gráfico para POI do MAGE com sinais de interferência para radares e características dos emissores

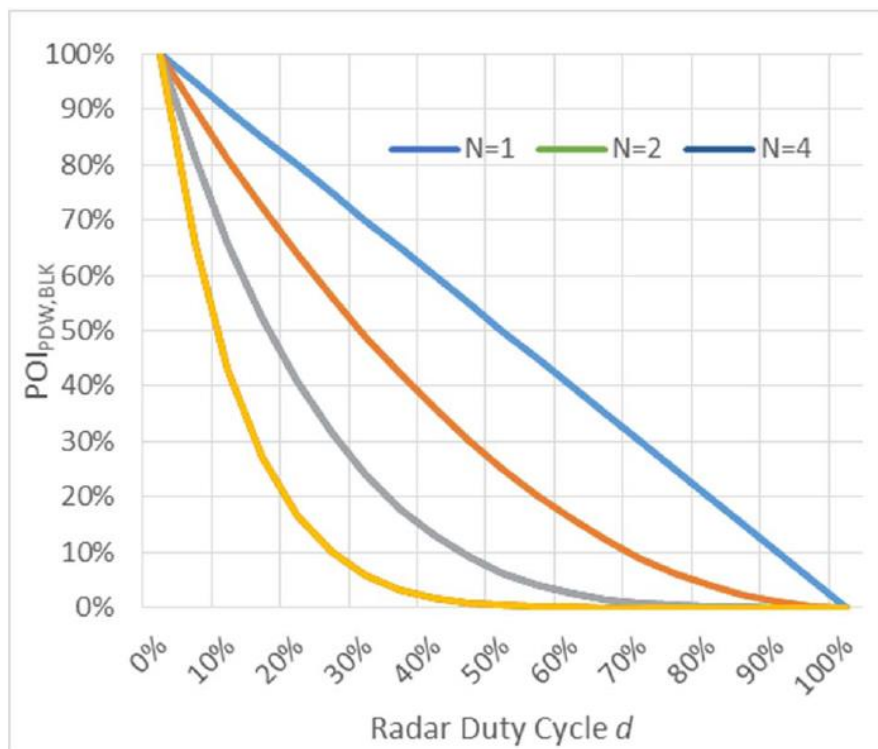
**Término**

Fonte: Próprio autor

As equações matemáticas apresentadas foram empregadas para confecção do código MATLAB do Apêndice A. Os parâmetros de entrada foram os apresentados por Celentano et. al (2020) e assim, produzidos dois resultados gráficos para análise.

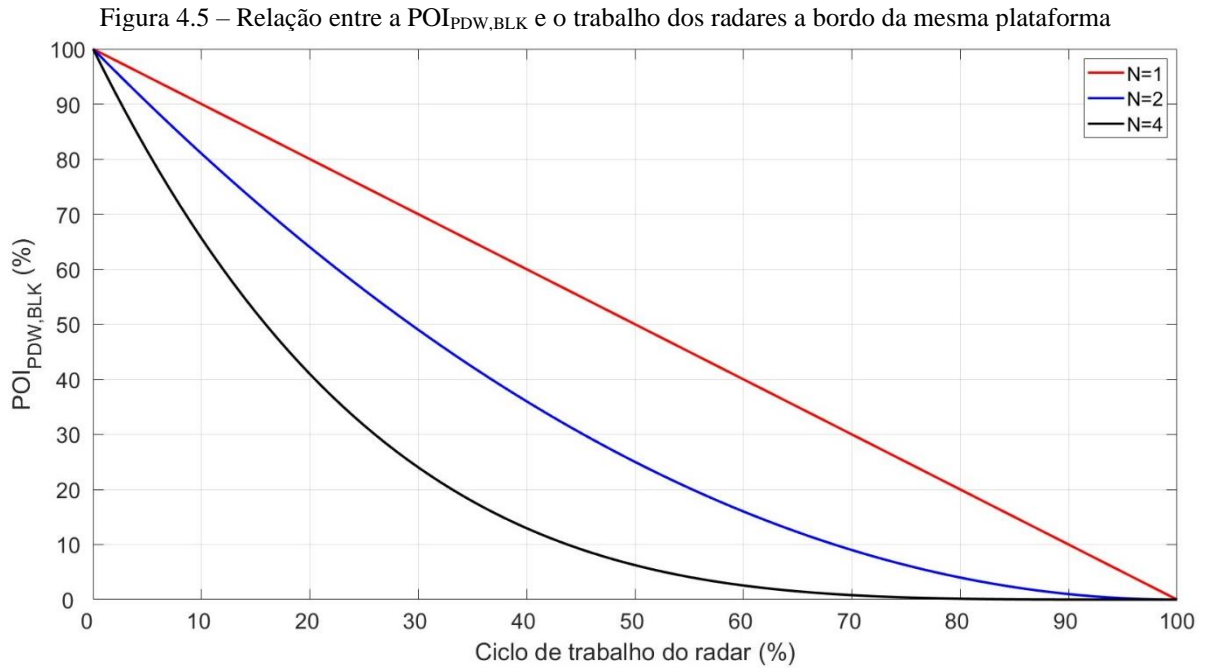
A figura 4.4, representa a POI de um sinal que possa ser processado e produza uma PDW que possa ser utilizada pelo equipamento MAGE em função do trabalho do radar. As curvas são apresentadas para 1, 2, 4 e 8 radares emissores a bordo da mesma plataforma. Observa-se que quanto maior o número de emissores mais acentuada é a interferência causada.

Figura 4.4 – Relação entre a  $POI_{PDW,BLK}$  e o trabalho dos radares a bordo da mesma plataforma



Fonte: Celentano et. al (2020)

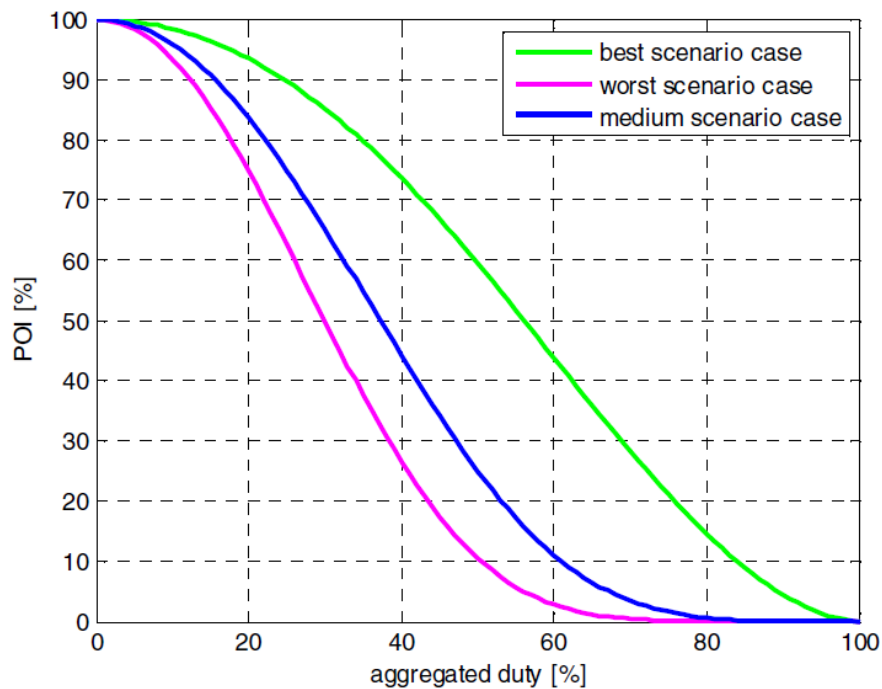
A figura 4.5 apresenta o resultado extraído da simulação desenvolvida e aplicada no software MATLAB, a qual apresentou os mesmos resultados obtidos pelos autores do modelo. A representação ocorreu para 1, 2 e 4 radares, mostrando o mesmo aspecto conforme aumentasse o número de radares a bordo da plataforma.



Fonte: Próprio autor

A  $POI$  de um sinal e a realização de todo o processamento do sinal pelo MAGE para que se identificar o sinal do emissor está representado na figura 4.6 em sua relação com o trabalho agregado dos radares a bordo causando, interferência para os casos de  $\beta$  igual a 1.5, 4 e 6.5.

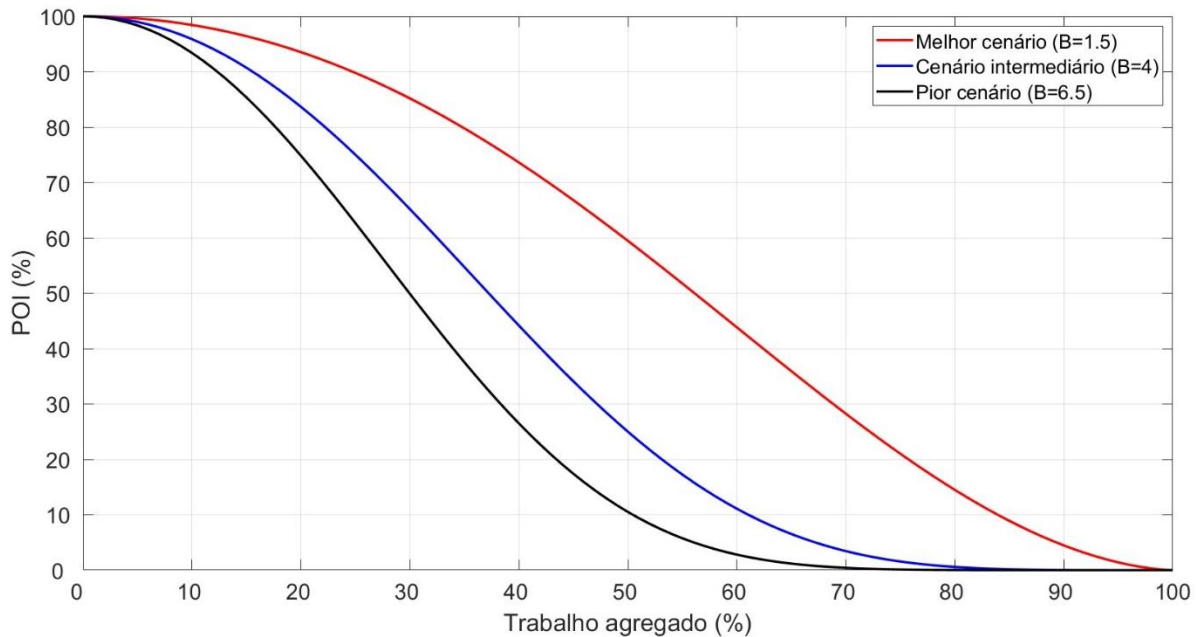
Figura 4.6 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor para diferentes cenários de interferência em função do trabalho dos interferidores



Fonte: Celentano et. al (2020)

A figura 4.7 apresenta os mesmos resultados da figura 4.6, tendo sido adquiridos pela aplicação do modelo matemático no código apresentado no apêndice A deste trabalho.

Figura 4.7 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor para diferentes cenários



Fonte: Próprio autor

As figuras 4.5 e 4.7 por apresentarem os mesmos resultados dos autores do modelo, validam o código criado e executado em MATLAB para aplicação deste modelo para os fins deste trabalho.

Os resultados para uma situação específica analisada é apresentado na tabela 4.4. Celentano et al. (2020) analisaram os casos para um radar com funcionamento normal e outro para o mesmo radar com sinal degradado em 6dB. Pode-se observar que a degradação, com ciclos de trabalho menores para as funções do radar, resultou em um aumento na POI do sinal de 25% para 80%.

Tabela 4.4 – Exemplo de resultado numérico para o modelo

	<b>d<sub>TX</sub></b>	<b>L</b>	<b>d<sub>IFF</sub></b>	<b>D<sub>4FF</sub></b>	<b>POI</b>
<b>Radar Normal</b>	17% busca baixa	30%	16%	50%	25%
	14% busca alta	50%			
	20% acompanhamento	20%			
<b>Radar degradado em 6dB</b>	4% busca baixa	30%	6%	22%	80%
	3,5% busca alta	50%			
	15% acompanhamento	20%			

Fonte: Celentano et al. (2020)

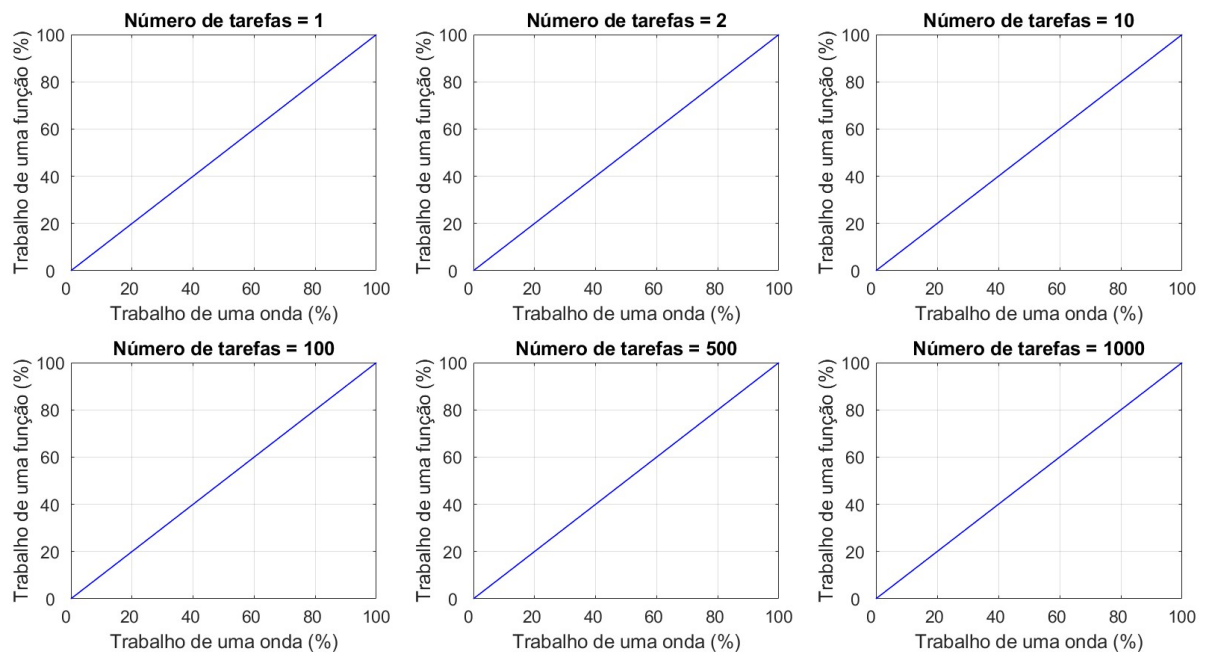
Os resultados apresentados na tabela 4.4 também foram alcançados o emprego dos códigos de MATLAB gerados a partir do modelo matemático apresentado pelas equações desta seção. O código para o radar com seu funcionamento normal e degradado em 6dB consta no Apêndice B.

## 5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O foco das análises foi concentrado a duas situações. A primeira situação está voltada em analisar como o número de tarefas executadas pelo radar para uma determinada função afetaria o trabalho executado por essa função e finalmente a POI do MAGE. E a segunda, em como a variação do ciclo de trabalho de diferentes funções afetam a POI do MAGE.

A figura 5.1 foi gerada para apresentar o resultado da análise da primeira situação apresentada. O código apresentado no Apêndice C, uma adaptação do modelo matemático para apresentar resultados gráficos para a situação analisada, nos permitiu a observação gráfica para o trabalho de uma função de um painel realizando 1, 2, 10, 100, 500 e 1.000 tarefas.

Figura 5.1 – Trabalho de uma função radar em função do trabalho da forma de onda para diferente número de tarefas realizados pelo radar



Fonte: Próprio autor

Pode-se observar que ao se considerar o trabalho de uma onda igual para qualquer uma das tarefas que estiver realizando, tem-se que para um mesmo valor do trabalho de uma forma de onda do radar o resultado para o trabalho de uma função é mesmo para qualquer que seja o número de tarefas que aquela função tenha que executar.

Esta análise é importante ao se verificar uma capacidade do radar Artisan de acompanhar mais de 900 alvos simultaneamente e do TRS-4D de acompanhar mais de 1.000 alvos. Pode-se verificar com os resultados apresentados na figura 5.1 que esse número elevado de alvos a serem acompanhados, as tarefas a serem executadas pelo radar, executam um mesmo

ciclo de trabalho para a função que um número pequeno de tarefas e não afeta em maior grau a POI do MAGE.

Para a segunda situação a ser analisada, as informações disponíveis a respeito dos radares Artisan e TRS-4D não foram suficientes para serem utilizadas como entradas no modelo. Dessa forma, optou-se por realizar uma análise ampla a respeito das principais funções realizadas por radares *phased array*.

De acordo com Moo e DiFilippo (2018), os radares para emprego naval possuem as seguintes características de interesse apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ciclo de trabalho para funções de um radar em emprego naval

<b>Função do radar</b>	<b>Ciclo de trabalho</b>
Busca volumétrica	10 a 30%
Busca de superfície	10 a 20%
Iluminação de alvos	50 a 100%

Fonte: Moo e DiFilippo (2018)

Empregando o código de MATLAB no Apêndice D e como dados de entrada os ciclos de trabalho para as funções de acordo com o apresentado na tabela 5.1 foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

## 5.1 Busca Volumétrica

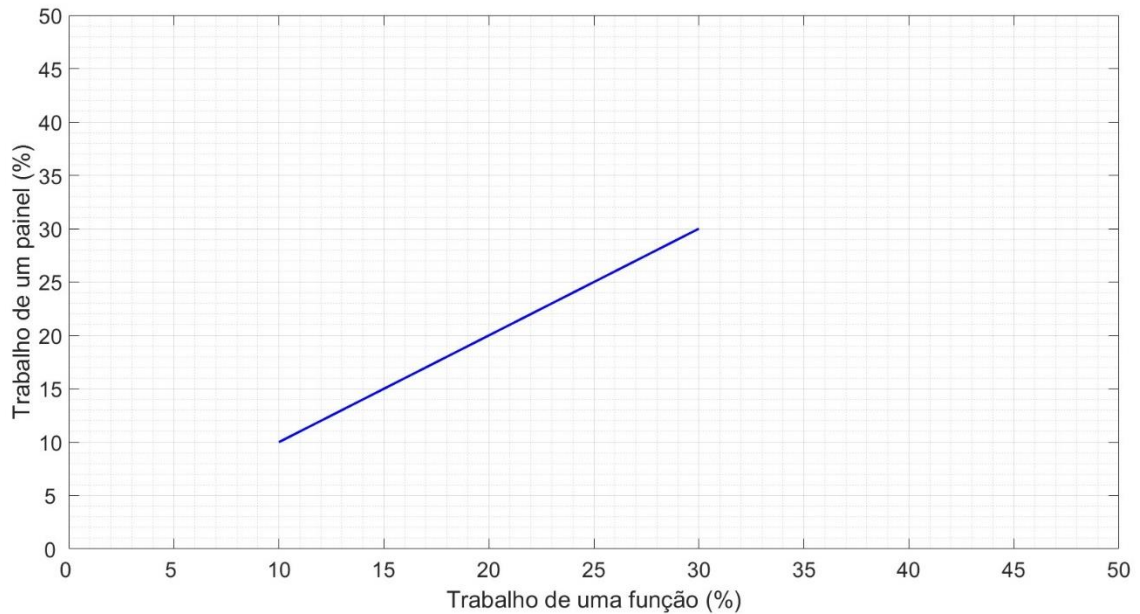
A função de busca volumétrica representa a busca de alvos aéreos, aviões e helicópteros, realizada em 3 dimensões, podendo definir a marcação ou direção, a distância e a altitude desses objetos.

Como apresentado por Moo e DiFilippo (2018), um radar *phased array*, com capacidade de realizar entre suas funções a busca volumétrica, possui um ciclo de trabalho que pode geralmente variar em um valor de 10 a 30%.

A figura 5.2 apresenta o resultado do trabalho de um painel realizando apenas esta função, ou seja, todo o recurso de tempo do radar está destinado à execução desta função. Pode-se observar que o aumento do trabalho da função resulta em um aumento diretamente proporcional do trabalho do painel. Para os valores limites do intervalo verificado, 10 e 30%, para o trabalho da função, observa-se os valores, também, de 10 e 30%, para o trabalho do painel.



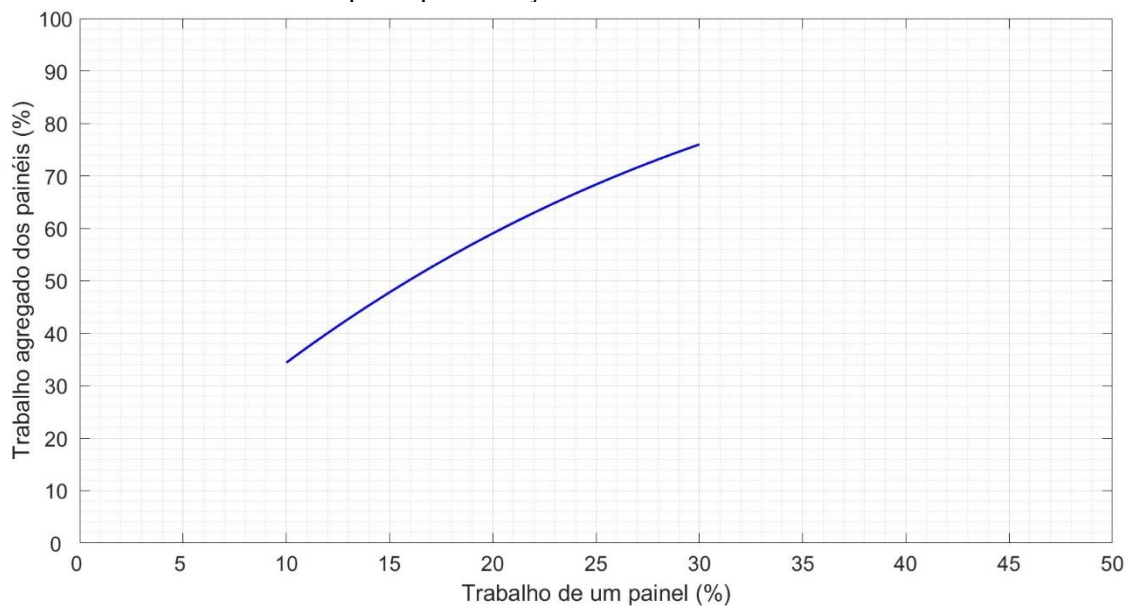
Figura 5.2 – Trabalho de um painel do radar em função do trabalho realizado pela execução de uma busca volumétrica



Fonte: Próprio autor

Para um radar *phased array* de múltiplos painéis, o trabalho do radar é função do trabalho agregado de todos os painéis, conforme apresentado pelo modelo matemático. A figura 5.3 apresenta o trabalho agregado de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel, considerando que todos os painéis executam a mesma função. O trabalho individual de cada painel foi calculado e apresentado na figura 5.2.

Figura 5.3 – Trabalho agregado dos painéis de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel para a função de busca volumétrica

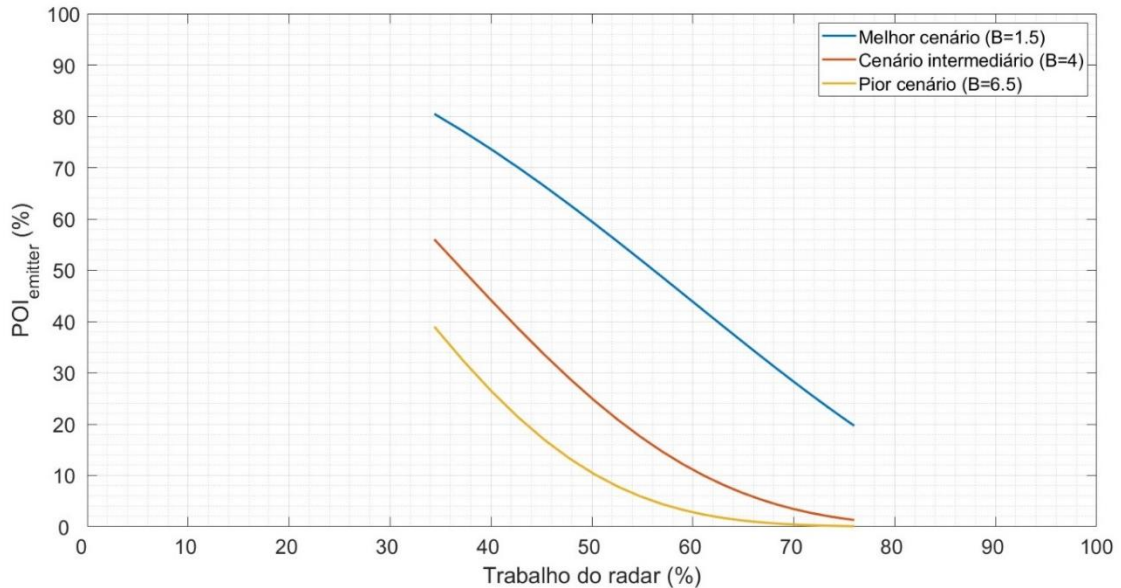


Fonte: Próprio autor

Pode-se observar que o aumento do trabalho dos painéis também reflete em um aumento do trabalho agregado de todos, obtendo-se como menor valor 34,39 e maior 75,99%.

Os valores obtidos foram empregados para calcular a POI do MAGE obter o sinal do emissor com um único radar operando a bordo da plataforma. A figura 5.4 apresenta a POI do MAGE em função do trabalho agregado apresentado na figura 5.3.

Figura 5.4 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor em função da interferência causada pelo trabalho de um radar a bordo da mesma plataforma realizando busca volumétrica



Fonte: Próprio autor

Os resultados mostram que o aumento do trabalho do radar causa uma diminuição na POI do MAGE obter os sinais desejados. Para a melhor situação possível, gerada pelo fator  $\beta$  igual a 1.5, determinado pelos autores do modelo, tem-se os valores de menor POI igual a 19,66% para trabalho do radar de 75,99% e de maior POI de 80,46% para trabalho do radar de 34,49%. Para a pior situação,  $\beta = 6.5$ , tem-se POI de 0,09% para o trabalho de 75,99% e POI de 38,98% para trabalho do radar de 34,49%.

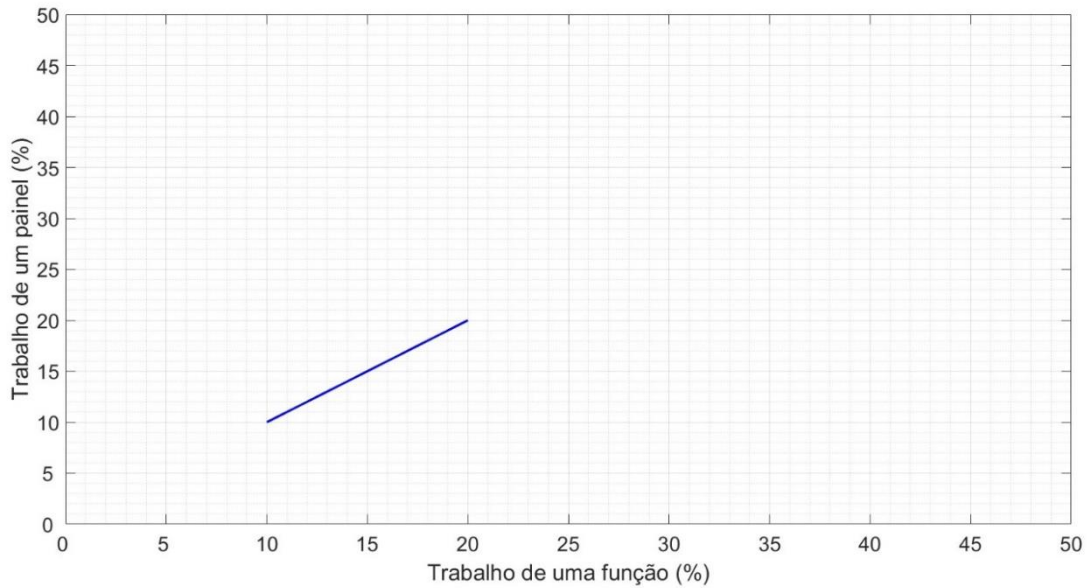
## 5.2 Busca de superfície

A função de busca de superfície é aquela que realiza a busca de alvos no horizonte sobre a superfície do mar, podendo definir a marcação ou direção e a distância desses alvos.

Como apresentado por Moo e DiFilippo (2018), um radar *phased array*, com capacidade de realizar entre suas funções a busca de superfície, possui um ciclo de trabalho que pode geralmente variar em um valor de 10 a 20%.

A figura 5.5 apresenta o resultado do trabalho de um painel realizando apenas esta função, ou seja, todo o recurso de tempo do radar está destinado à execução desta função.

Figura 5.5 – Trabalho de um painel do radar em função do trabalho realizado pela execução de uma busca de superfície

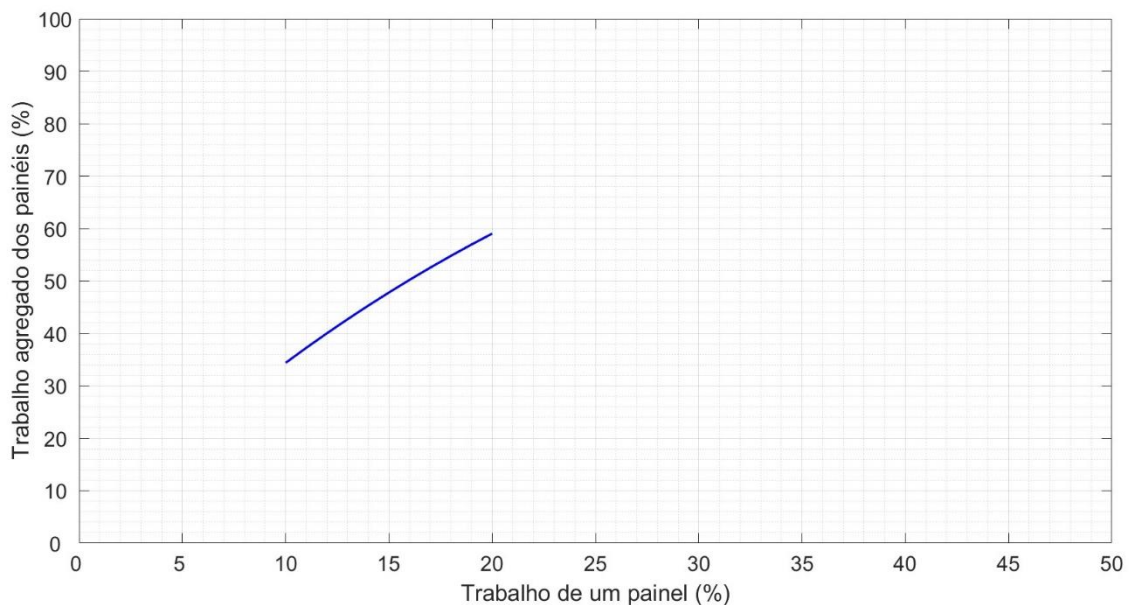


Fonte: Próprio autor

Assim como para a função de busca volumétrica, pode-se observar que o aumento do trabalho da função resulta em um aumento diretamente proporcional do trabalho do painel. Para os valores limites do intervalo verificado, 10 e 20%, para o trabalho da função, observa-se os valores, também, de 10 e 20%, para o trabalho do painel.

A figura 5.6 apresenta o trabalho agregado de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel, considerando que todos os painéis executam a mesma função. O trabalho individual de cada painel foi calculado e apresentado na figura 5.5.

Figura 5.6 – Trabalho agregado dos painéis de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel para a função de busca de superfície

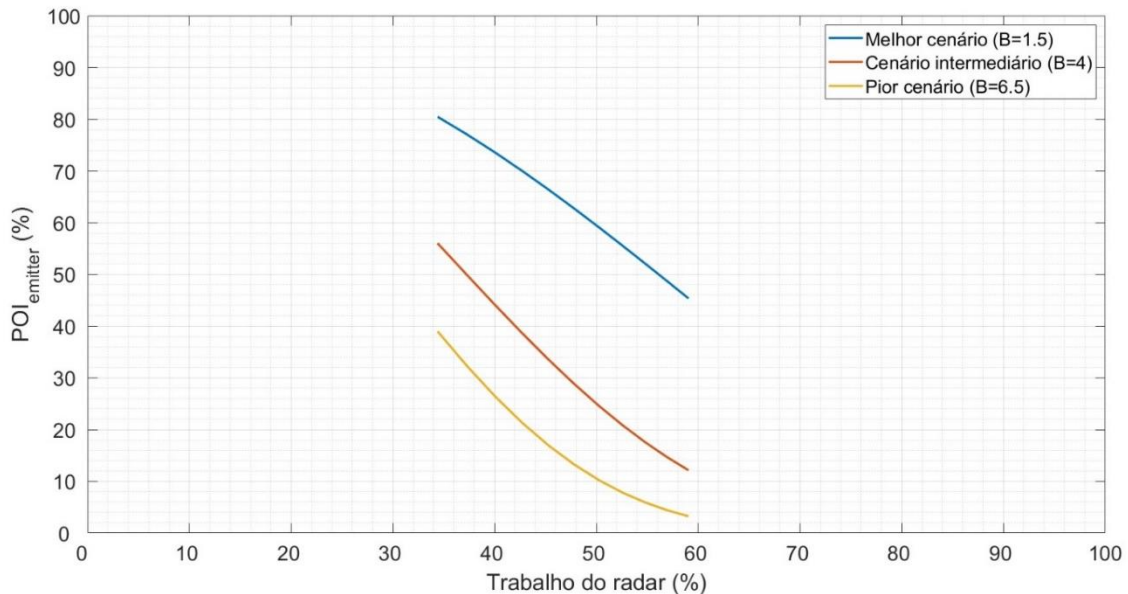


Fonte: Próprio autor

Pode-se observar que o aumento do trabalho dos painéis também reflete em um aumento do trabalho agregado de todos, obtendo-se como menor valor 34,39 e maior 59,04%.

Os valores obtidos foram empregados para calcular a POI do MAGE obter o sinal do emissor com um único radar operando a bordo da plataforma. A figura 5.7 apresenta a POI do MAGE em função do trabalho agregado apresentado na figura 5.6.

Figura 5.7 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor em função da interferência causada pelo trabalho de um radar a bordo da mesma plataforma realizando busca de superfície



Fonte: Próprio autor

O gráfico mostra que o aumento do trabalho do radar causa uma redução na POI do MAGE obter os sinais desejados. Para a melhor situação possível, com o fator  $\beta$  igual a 1.5, tem-se os valores de menor POI igual a 45,36% para trabalho do radar de 59,04% e de maior POI de 80,46% para trabalho do radar de 34,49%. Para a pior situação,  $\beta = 6.5$ , tem-se POI de 3,25% para o trabalho de 75,99% e POI de 38,98% para trabalho do radar de 34,49%.

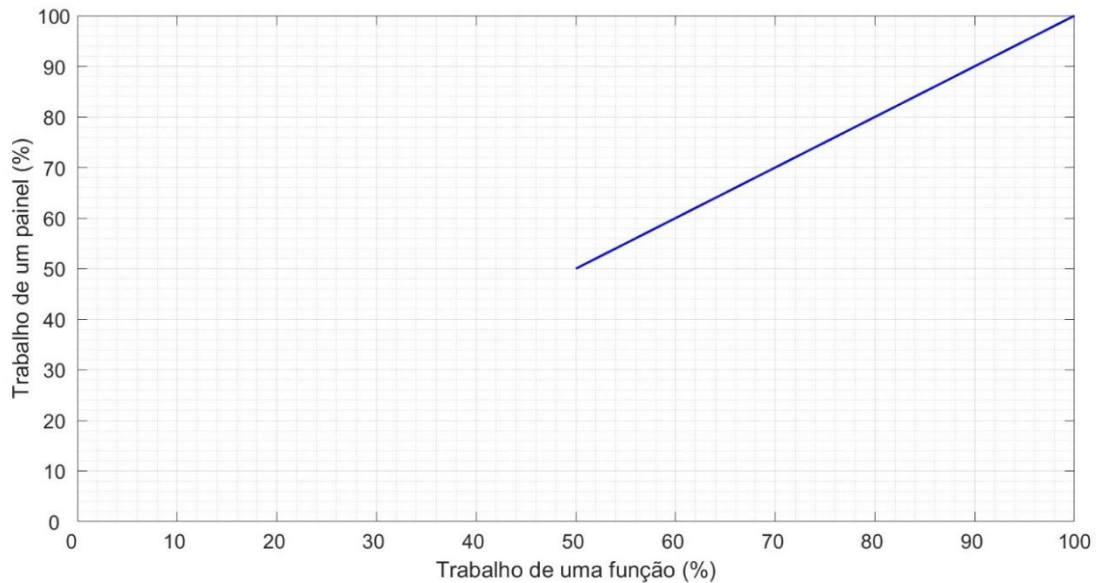
### 5.3 Iluminação de alvo

A iluminação de alvos é responsável por fornecer a informação necessária a sistemas de armas que não possuem guiagem própria.

Como apresentado por Moo e DiFilippo (2018), um radar *phased array*, com capacidade de realizar entre suas funções a iluminação de alvos, possui um ciclo de trabalho que pode geralmente variar em um valor de 50 a 100%.

A figura 5.8 apresenta o resultado do trabalho de um painel realizando apenas esta função, ou seja, todo o recurso de tempo do radar está destinado à execução desta função.

Figura 5.8 – Trabalho de um painel do radar em função do trabalho realizado pela execução de iluminação de um alvo

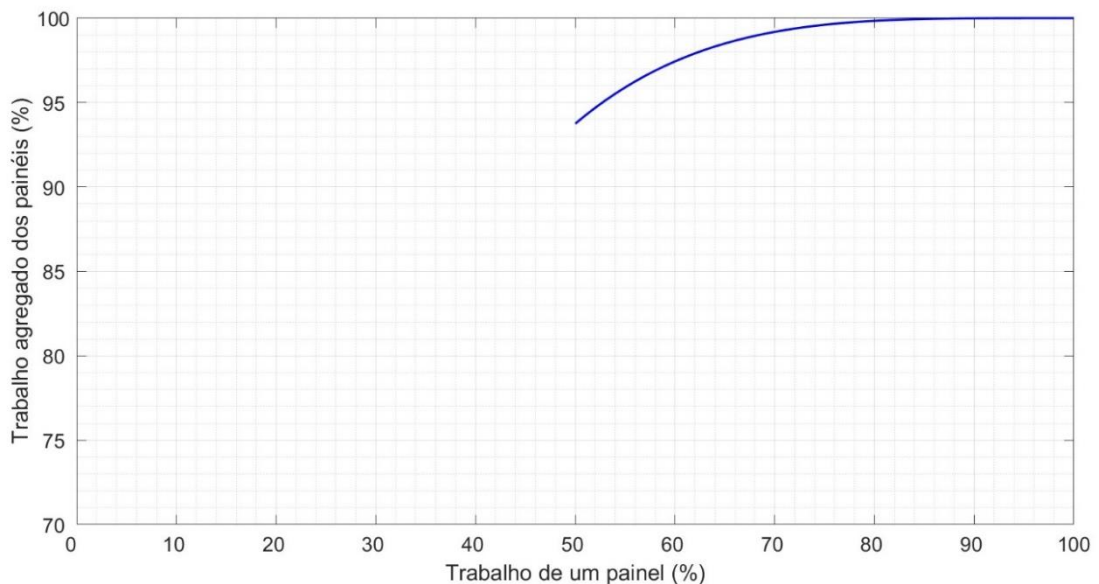


Fonte: Próprio autor

Assim como para as funções anteriores, pode-se observar que o aumento do trabalho da função resulta em um aumento diretamente proporcional do trabalho do painel. Para os valores limites do intervalo verificado, 50 e 100%, para o trabalho da função, observa-se os valores, também, de 50 e 100%, para o trabalho do painel.

A figura 5.9 apresenta o trabalho agregado de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel, considerando que todos os painéis executam a mesma função. O trabalho individual de cada painel foi calculado e apresentado na figura 5.8.

Figura 5.9 – Trabalho agregado dos painéis de um radar com 4 painéis em função do trabalho individual de cada painel para a função de iluminação de alvos

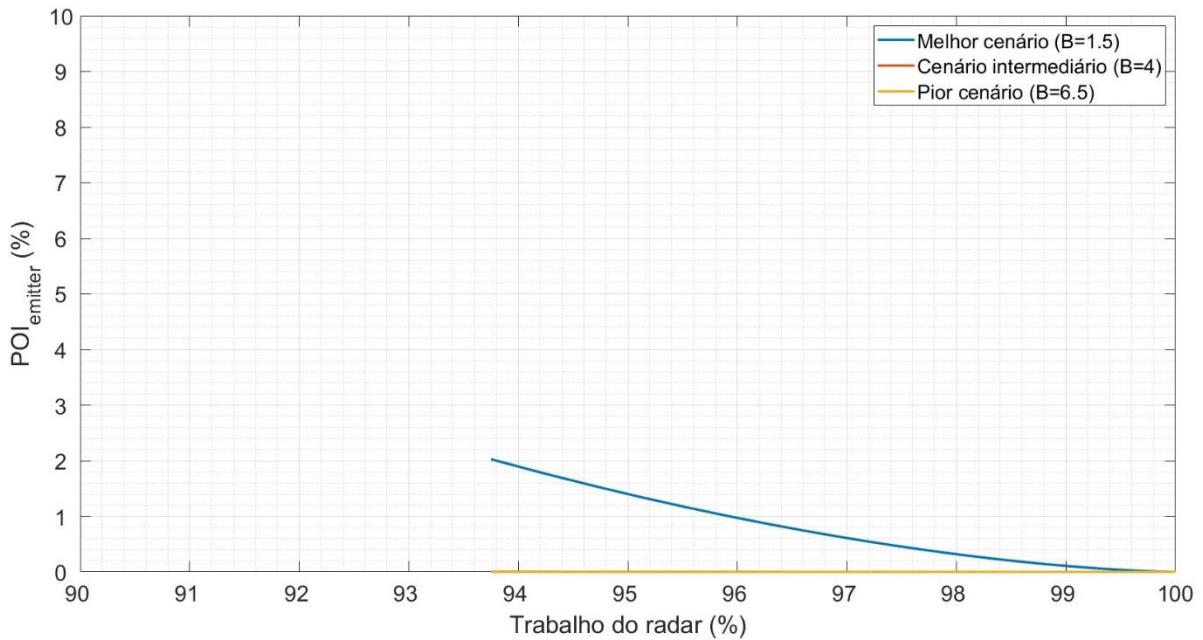


Fonte: Próprio autor

O aumento do trabalho dos painéis também reflete em um aumento do trabalho agregado de todos, obtendo-se para esta função valores entre 93,75 e 100%.

Os valores obtidos foram empregados para calcular a POI do MAGE obter o sinal do emissor com um único radar operando a bordo da plataforma. A figura 5.10 apresenta a POI do MAGE em função do trabalho agregado apresentado na figura 5.9.

Figura 5.10 – Probabilidade do MAGE identificar um emissor em função da interferência causada pelo trabalho de um radar a bordo da mesma plataforma realizando iluminação de alvo



Fonte: Próprio autor

Os resultados apresentados mostram que o aumento do trabalho do radar causa uma redução na POI do MAGE obter os sinais desejados. Para qualquer situação, considerando qualquer valor para o fator  $\beta$  igual a 1.5, tem-se os valores POI igual a 0% para trabalho do radar de 100%. Para os casos em que o trabalho do radar é o menor possível, 93,75%, com os valores de  $\beta$  iguais a 4 e 6.5 o valor da POI já é aproximadamente 0% e no melhor caso com  $\beta$  igual a 1.5, tem-se o maior valor para a POI de aproximadamente 2%.

A tabela 5.2 apresenta a consolidação dos resultados obtidos e apresentados graficamente anteriormente, focando nos valores limites do ciclo de trabalho de uma função como parâmetros de entrada do modelo. A POI apresentada foi a de um cenário considerado intermediário, levando em consideração o valor de  $\beta$  igual a 4, em que as características do emissor a ser interceptado não se trata nem do pior nem do melhor caso apresentado por Celentano et al. (2020).

Tabela 5.2 – Dados consolidados da probabilidade do MAGE identificar o emissor com a realização das diversas funções do radar de bordo individualmente

<b>Função radar</b>	<b>d<sub>TX</sub></b>	<b>L</b>	<b>d<sub>IFF</sub></b>	<b>d<sub>4FF</sub></b>	<b>POI</b>
<b>Busca volumétrica</b>	10%	100%	10%	34,39%	56,01%
	30%	100%	30%	75,99%	1,31%
<b>Busca de superfície</b>	10%	100%	10%	34,39%	56,01%
	20%	100%	20%	59,04%	12,14%
<b>Direção de tiro</b>	50%	100%	50%	93,75%	0%
	100%	100%	100%	100%	0%

Fonte: Próprio autor

## 5.4 RAN-20S

O radar RAN-20S é um radar de vigilância de busca combinada e possui duas funções: busca de longo alcance e busca de médio alcance. O radar possui uma antena giratória com um único painel e para cada uma das funções trabalha com a transmissão de dois pulsos em sequência com larguras de pulso distintas para poder realizar a identificação de alvos a curta distância enquanto realiza a busca a média e longa distância.

O ciclo de trabalho do radar foi calculado levando em consideração a forma de onda com os dois pulsos transmitidos para cada uma das funções com suas respectivas PRF.

A tabela 5.3 apresenta a POI do MAGE interceptar um sinal na presença de emissões desse radar, para a realização de cada uma das funções separadamente.

Tabela 5.3 – Probabilidade de interceptação de um emissor pelo MAGE com o radar RAN-20S operando

<b>Função radar</b>	<b>d<sub>TX</sub></b>	<b>L</b>	<b>d<sub>IFF</sub></b>	<b>POI</b>
<b>Busca a longa distância</b>	8,78%	100%	8,78%	96,82%
<b>Busca a média distância</b>	6,93%	100%	6,93%	98,02%

Fonte: Próprio autor

Pode-se observar uma baixa interferência do RAN-20S no desempenho do MAGE, sendo a POI, para o valor de  $\beta$  igual a 4, maior que 96% para busca a longa distância e maior que 98% para busca a média distância.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, dentro do contexto atual da guerra eletrônica e do uso do espectro eletromagnético, explorou-se como a presença de radares, especificamente os do tipo *phased array*, a bordo de uma plataforma interfere na capacidade do equipamento MAGE de interceptar sinais de fontes externas.

Discutiu-se o funcionamento dos radares *phased array*, diferenciando os tipos PESA e AESA, elucidando a formação dos feixes e sua habilidade de executar múltiplas funções simultaneamente. Adicionalmente, foi abordado o funcionamento do equipamento MAGE, detalhando o processamento e a separação dos sinais captados, bem como os desafios em identificar um radar *phased array*.

Com o emprego do *software* MATLAB foi possível reproduzir os resultados alcançados por Celentano et al. (2020) e utilizar o modelo matemático para avaliar como o número de tarefas e o ciclo de trabalho, para realizar cada uma das funções, influencia a probabilidade de detecção de sinais pelo MAGE. Esta análise permitiu avaliar a coexistência de radares *phased array* e equipamentos MAGE operando em uma mesma plataforma.

Os resultados apresentados indicaram que ao aumentar o número de tarefas para uma função específica, mantendo o ciclo de trabalho constante para cada onda eletromagnética emitida, o ciclo de trabalho para aquela função não é alterado e não assim também não modifica a POI do MAGE.

As diferentes funções do radar exigem diferentes ciclos de trabalho para cumprir com seus objetivos. Dessa forma, também foi avaliado como o aumento do ciclo de trabalho para busca de superfície, busca volumétrica e iluminação de alvos afeta a POI do MAGE. Foi observado que esse aumento resulta em uma diminuição da POI, independentemente da função que o radar desempenha.

### 6.1 Considerações Finais

Diante das mais diversas ameaças que ainda surgem e pela rápida evolução tecnológica que redefine as capacidades militares globais, é imperativo que o Brasil, como um Estado soberano, fortaleça suas Forças Armadas, particularmente a Marinha, para estar à altura de outras nações.

O financiamento de projetos tecnológicos exige investimentos consideráveis. Dada a pressão sobre os recursos do Estado, oriundos dos impostos dos cidadãos e com demanda de diversos setores, torna-se crucial uma gestão eficiente na alocação desses recursos para a defesa.



Dessa forma, este trabalho pode apresentar um método de economia de recursos ao proporcionar um melhor desenvolvimento de projetos de plataformas navais, em especial, de radares e MAGE que coexistam. Esse método poderia reduzir a necessidade de custosas avaliações operacionais pós-aquisição, garantindo que tais sistemas operem de forma harmônica e eficaz desde o início.

Além disso, as informações específicas dos radares da MB, bem como do futuro radar das Fragatas Classe Tamandaré, são protegidas por sigilo, o que torna uma análise detalhada inadequada para este estudo. Contudo, os resultados aqui gerados podem ser úteis para os setores competentes da MB. As informações sobre o ciclo de trabalho desses radares podem ser comparadas com os resultados deste estudo para avaliações mais aprofundadas.

## 6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Este estudo se concentra na coexistência específica entre radares *phased array* (AESA e PESA) e equipamentos MAGE, representando apenas uma pequena parcela dos possíveis sensores em navios de guerra. Desta forma sugere-se aprofundar a pesquisa realizada nas seguintes áreas:

- a) Buscar modelos matemáticos que possam avaliar a coexistência de outros tipos de radares, como os tradicionais pulsados ou de onda contínua, e outras arquiteturas de *arrays* que vem sendo estudadas, como o de conjunto oportunista e de *Multiple-input Multiple-output* (MIMO). Estes radares também transmitem sinais no espectro eletromagnético que podem afetar o desempenho de equipamentos MAGE.
- b) Investigar a diferença proporcionada entre os radares *phased array* com painéis fixos versus antenas rotativas e analisar se o direcionamento do feixe de uma onda gerada pelo radar sempre afeta o MAGE, considerando que, dependendo da direção de propagação, o sinal pode não ser recebido.
- c) Tendo em vista que o modelo MAGE de Celentano et al. (2020) se baseou em uma versão genérica do equipamento, seria pertinente explorar diferentes tipos de receptores e técnicas de processamento de sinal para maior exatidão dos resultados apresentados pela modelagem.

## REFERÊNCIAS

- AGLIO, Douglas da Silva. **RADARES PHASED ARRAY ATIVOS**: A importância de uma tecnologia totalmente nacional. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento Avançado em guerra Eletrônica para Oficiais) – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2022.
- BAE SYSTEMS. **Artisan Medium Range Radar Type 997**. 2023. Disponível em: <https://www.baesystems.com/en/product/artisan-medium-range-radar-type-997>. Acesso em: 10 set. 2023.
- BARKAN, Uri; YEHUDA, Shuki. Trends in radar and electronic warfare technologies and their influence on the electromagnetic spectrum evolution. In: **2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel**, Éliat, Israel, p. 1-5, 2012. DOI: 10.1109/EEEI.2012.6377067.
- BERG, Simon; TONNAER, Annemieke. Evolution of naval AESA radars. In: **The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)**, Haia, Holanda, p. 557-559, 2014. DOI: 10.1109/EuCAP.2014.6901817.
- BIL, R.; HOLPP, W. Naval radar trends: A look back - a look forward. In: **2015 16th International Radar Symposium (IRS)**, Dresden, Alemanha, 2015, p. 13-19, 2015, DOI: 10.1109/IRS.2015.7226359.
- CASTILLO-RUBIO, Carlos F.; PASCUA, J. M. Current Full Digital Phased-Array Radar developments for Naval applications. In: **2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)**, Waltham, EUA, p. 1-6, 2019. DOI: 10.1109/PAST43306.2019.9021011.
- CELENTANO, S.; FARINA, A.; TIMMONERI, L.; FOGLIA, G. Co-existence of AESA (Active Electronically Scanned Array) radar and Electronic Warfare (EW) systems on board of a military ship. In: **2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)**, Florença, Itália, p. 1-5, 2020, DOI: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266352.
- DING, Zhen; MOO, Peter. Benefits of target prioritization for phased array radar resource management. In: **2017 18th International Radar Symposium (IRS)**, Praga, República Tcheca, p. 1-7, 2017, DOI: 10.23919/IRS.2017.8008153
- FREITAS, Klinger L. C. Silva. **RADARES “PHASED-ARRAY”**: características e aplicabilidades no atual cenário de Guerra Eletrônica. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento Avançado em guerra Eletrônica para Oficiais) – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2021.
- GALANTE, Alexandre. F40 aos Quarenta – sexta parte. **Poder Naval**, 2018. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/01/25/f40-aos-quarenta-sexta-parte/> Acesso em: 06 set. 2023.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HERD, Jeffrey; CONWAY, David. The Evolution to Modern Phased Array Architectures. **Proceedings of the IEEE**. v. 104, n. 3, p. 519-529, mar. 2016, DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494879.

HENSOLDT. Datasheet. **HENSOLDT TRS-4D ® Fixed Panel**, 2023. Disponível em: <https://dam.hensoldt.net/m/2576074c2931e885/original/TRS-4D-Fixed-Panel-English.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2023.

HENSOLDT. Datasheet. **TRS-4D® Rotator**, 2023. Disponível em: <https://dam.hensoldt.net/m/1cc7b53da977b083/original/TRS-4D-Datasheet-english.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2023.

JUNIOR, Paulo R. B. Fragatas Classe Tamandaré estão em fase avançada de configuração. **Tecnologia e Defesa**, 10 jun. 2021. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/fragatas-classe-tamandare-estao-em-fase-avancada-de-configuracao/>. Acesso em: 06 set. 2023.

LABREUCHE, C.; BURON, C.; MOO P.; BARBARESCO, F. Multi-criteria Performance Assessment of Adaptive Radar Resources Management: Application to Naval Scenario. In: **2019 20th International Radar Symposium (IRS)**, Ulm, Alemanha, p. 1-6, 2019, DOI: 10.23919/IRS.2019.8768114.

MAILLOUX, Robert J. **Phased Array Antenna Handbook**. 3. ed. Norwood: Artech House, 2018.

MISHRA, Amlan K. AESA radar and its application. In: **2018 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT)**, Chennai, Índia, p. 205-209, 2018. DOI: 10.1109/IC3IoT.2018.8668101.

MOO, Peter W.; DIFILIPPO, David J. Overview of Naval Multifunction RF Systems. In: **2018 15th European Radar Conference (EuRAD)**, Madrid, Espanha, p. 178-181, 2018. DOI: 10.23919/EuRAD.2018.8546521.

NASCIMENTO, Marcos P. C. **PERSPECTIVAS DA GUERRA ELETRÔNICA NO SÉCULO XXI: Um enfoque nos navios-escoltas da esquadra brasileira**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento Avançado em guerra Eletrônica para Oficiais) – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2021.

NERI, Filippo. **Introduction to Electronic Defense Systems**. 3. ed. Norwood: Artech House, 2018.

ROBERTSON, Sue. **Practical ESM Analysis**. 1. ed. Norwood: Artech House, 2019.

SCHIKORR, M.; DOMANN, A.; WOLF, G.; WRANIK, M.; VALLANT, G. TRS-4D radar: Test program and use of processing reference model. In: **2014 11th European Radar Conference**, Roma, Itália, p. 313-316, 2014, DOI: 10.1109/EuRAD.2014.6991270.

SCHIKORR, M.; FUCHS, U.; BOCKMAIR, M. Radar resource management study for multifunction phased array radar. In: **2016 European Radar Conference (EuRAD)**, Londres, Reino Unido, p. 213-216, 2016.

SGAMBATO, P. *et al.* System manager for AESA radar systems. In: **2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)**, Arlington, EUA, p. 1734-1738, 2015, DOI: 10.1109/RADAR.2015.7131279.

SHARMA, Purabi; SARMA, Kandarpa; MASTORAKIS, Nikos. Artificial Intelligence Aided Electronic Warfare Systems- Recent Trends and Evolving Applications. In: **IEEE Access**, vol. 8, p. 224761-224780, dez. 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3044453.

SKOLNIK, Merrill I. **Radar Handbook**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Companies, 2008.

TALISA, S. H.; O'HAVER, K. W.; COMBERIATE, T. M.; SHARP, M. D.; SOMERLOCK, O. F. Somerlock. Benefits of Digital Phased Array Radars. In: **Proceedings of the IEEE**, vol. 104, no. 3, p. 530-543, mar. 2016, DOI: 10.1109/JPROC.2016.2515842.

TONG, Chin Hong Matthew. **System study and design of broad-band U-Slot microstrip patch antennas for aperstructures and opportunistic arrays**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência em Tecnologia de Sistemas de Combate) – Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2005.

WANG, B.; HANG, Q.; GAO, C.; FENG, Z.; ZHANG Y. Interference analysis and visualization for multiple radio equipment coexistence. In: **2015 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM)**, Vitória, Canadá, p. 298-303, 2015, DOI: 10.1109/PACRIM.2015.7334851.

YURYEVICH, Zhiburtovich. Electronic warfare as a task of maintaining homeostasis in an information conflict. In: **2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications**, Moscou, Rússia, p. 1-5, 2020. DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078602.

## APÊNDICE A

```
%% Modelo MAGE %%
```

```
clear, clc, close all
```

```
%% Variáveis
```

```
POI_pdw = 1;
```

```
beta = [1.5 4 6.5];
```

```
%% Probabilidade de produzir PDW com interferência do sinal radar
```

```
N = 1;
```

```
i = 0;
```

```
while N<=4
```

```
    i = i+1;
```

```
    w = 0;
```

```
    for d = 0:0.01:1;
```

```
        w = w+1;
```

```
        POI_pdw_blk (i,w) = POI_pdw*((1-d)^N);
```

```
        d_var(w) = d;
```

```
    end
```

```
    N = N*2;
```

```
end
```

```
% Gráfico
```

```
figure, plot (d_var,POI_pdw_blk(1,:), 'r-', 'LineWidth', 2)
```

```
hold on, plot (d_var,POI_pdw_blk(2,:), 'b-', 'LineWidth', 2)
```

```
hold on, plot (d_var,POI_pdw_blk(3,:), 'k-', 'LineWidth', 2)
```

```
xlim ([0 1])
```

```
grid on
```

```
legend ('N=1','N=2','N=4')
```

```
xlabel ('Ciclo de trabalho do radar (%)')
```

```

ylabel ('POI_{PDW,BLK} (%)')
a = 0:10:100;
set(gca,'FontSize',18, 'xticklabel',a, 'yticklabel',a)

%% POI para interceptar o sinal de um emissor
for j = 1:length(beta)
    w = 0;
    for d_mff = 0:0.01:1
        w = w+1;
        POI_emitter(j,w) = POI_pdw*((1-d_mff)^(beta(j)*d_mff));
        d_mff_var(w) = d_mff;
    end
end

end

% Gráfico
figure, plot (d_mff_var,POI_emitter(1,:),'r-', 'LineWidth', 2)
hold on, plot (d_mff_var,POI_emitter(2,:),'b-', 'LineWidth', 2)
hold on, plot (d_mff_var,POI_emitter(3,:),'k-', 'LineWidth', 2)
xlim ([0 1])
grid on
legend ('Melhor cenário (B=1.5)', 'Cenário intermediário (B=4)', ...
        'Pior cenário (B=6.5)')
xlabel ('Trabalho agregado (%)')
ylabel ('POI (%)')
a = 0:10:100;
set(gca,'FontSize',18, 'xticklabel',a, 'yticklabel',a)

```

## APÊNDICE B

```
%% Scheduler AESA %%
```

```
clear, clc, close all
```

```
%% Definindo variáveis
```

```
M = 4;           % número de painéis
N_func = 3;      % número de funções/atividades do radar
N_task = 1;      % número de tarefas da k-ésima função do
                 % p-ésimo painel
d_wf = 1;        % trabalho de TX da i-ésima forma de onda da
                 % k-ésima função do p-ésimo painel
L = [0.3 0.5 0.2]; % tempo de recursos alocado a k-ésima função
                 % do p-ésimo painel
```

```
%% Entrada do modelo numérico apresentado
```

```
d_TX = [0.17 0.14 0.2];
disp(['d_TXk é: ', num2str(d_TX)])
```

```
%% Trabalho de TX do p-ésimo painel
```

```
d_1ff = 0;
for k = 1:N_func
    d_1ff = d_1ff + L(k)*d_TX(k);
end
disp(['d_1ff é: ', num2str(d_1ff)])
```

```
%% Trabalho agredado de TX dos M paineis
```

```
d_mff = 1 - (1-d_1ff)^M;
disp(['d_mff é: ', num2str(d_mff)])
```

```
%% MAGE %%
```

```

%% Variáveis
N = 4;           % Número de radares
POI_pdw = 1;     % probabilidade de conseguir uma PDW utilizável
beta = [1.5 4 6.5]; % coeficientes relativo as características dos
                  % emissores

d = d_mff;

%% Probabilidade de produzir PDW com interferência do sinal radar
prod = 1;
for i = 1:N
    prod = prod*(1-d);
end
POI_pdw_blk = POI_pdw*prod;
disp(['POI_pdw_blk é: ', num2str(POI_pdw_blk)])

%% Probabilidade de interceptar o sinal
for i = 1:length(beta)
    POI_emitter (i) = POI_pdw*((1-d)^(beta(i)*d));
    disp (['POI_emitter ', num2str(i), ' é: ', num2str(POI_emitter (i))])
end

```



## APÊNDICE C

```

%% Trabalho de uma função do radar %%
% Este código testa a como o número de tarefas a serem executadas pelo
% radar para uma determinada função afeta o ciclo de trabalho de
% transmissão quando o trabalho de transmissão das diversas formas de onda
% geradas para realizar aquela tarefa se mantém constante

%% Início do código
clear, clc, close all

%% Definindo variáveis
N_task = 1000;      % número de tarefas da k-ésima função do
                   % p-ésimo painel
d_wf = 0:0.01:1;   % trabalho de TX da i-ésima forma de onda da
                   % k-ésima função do p-ésimo painel

%% Trabalho de TX da k-ésima função
d_TX(N_task,length(d_wf)) = zeros;
for i = 2:N_task
    for k = 1:length(d_wf)
        d_TX(1,k) = d_wf(1,k);
        d_TX(i,k) = d_TX(i-1,k) + d_wf(1,k);
    end
end
for i = 1:N_task
    for k = 1:length(d_wf)
        d_TX(i,k) = d_TX(i,k) / i;
    end
end

%% Gráfico
figure,

```

```
b = [1 2 10 100 500 1000];
for n = 1:6
subplot (2,3,n), plot (d_wf,d_TX(b(n),:),'b-', 'LineWidth', 1)
grid on
a = 0:20:100;
set(gca,'FontSize',14, 'xticklabel',a, 'yticklabel',a)
xlabel ('Trabalho de uma onda (%)')
ylabel ('Trabalho de uma função (%)')
txt1 = 'Número de tarefas = %d';
titulo = sprintf(txt1, b(n));
title (titulo)
end
```

## APÊNDICE D

```

%% AESA realizando uma função%%

clear, clc, close all

%% Definindo variáveis
M = 4;           % número de painéis
N_func = 1;      % número de funções/atividades do radar
L = 1;           % tempo de recursos alocado a k-ésima função
                  % do p-ésimo painel

d_TX_min = 0.1;
d_TX_max = 0.2;

%% Trabalho de TX do p-ésimo painel
d_TX = d_TX_min:0.01:d_TX_max;
d_1ff = L.*d_TX;
%Gráfico
figure, plot (d_TX, d_1ff,'b-', 'LineWidth', 2)
grid on
grid minor
xlim ([0 0.5])
ylim ([0 0.5])
a = 0:5:50;
set(gca,'FontSize',14, 'xticklabel',a, 'yticklabel',a)
xlabel ('Trabalho de uma função (%)')
ylabel ('Trabalho de um painel (%)')

%% Trabalho agregado de TX dos M painéis
for k = 1:length(d_TX)
    d_mff(k) = 1 - (1-d_1ff(k))^M;
end
%Gráfico

```

```

figure, plot (d_1ff,d_mff,'b-', 'LineWidth', 2)
grid on
grid minor
xlim ([0 0.5])
ylim ([0 1])
a = 0:5:50;
b = 0:10:100;
set(gca,'FontSize',14, 'xticklabel',a, 'yticklabel',b)
xlabel ('Trabalho de um painel (%)')
ylabel ('Trabalho agregado dos painéis (%)')

%% MAGE %%

%% Variáveis
N = 1;           % Número de radares
POI_pdw = 1;    % probabilidade de conseguir uma PDW utilizável
beta = [1.5 4 6.5]; % coeficientes relativo as características dos
                % emissores

%% Probabilidade de produzir PDW com interferência do sinal radar
prod = ones(1,length(d_TX));
for i = 1:N
    prod = prod.*(1-d_mff);
end
for k = 1:length(d_TX)
    POI_pdw_blk(k) = POI_pdw*prod(k);
end

%% Probabilidade de interceptar o sinal
POI_emitter (length(beta)) = zeros;
for i = 1:length(beta)
    for k = 1:length(d_TX)
        POI_emitter(i,k) = POI_pdw*((1-d_mff(k))^(beta(i)*d_mff(k)));
    end
end

```

```
end
%Gráfico
figure, plot (d_mff, POI_emitter, 'LineWidth', 2)
grid on
grid minor
xlim ([0 1])
ylim ([0 1])
b = 0:10:100;
set(gca,'FontSize',14, 'xticklabel',b, 'yticklabel',b)
xlabel ('Trabalho do radar (%)')
ylabel ('POI_{emitter} (%)')
legend ('Melhor cenário (B=1.5)', 'Cenário intermediário (B=4)', ...
        'Pior cenário (B=6.5)')
```