



# ESCOLA NAVAL



*talant de biefaire*

Bruno Miguel Monteiro Moniz

**Desenvolvimento de um simulador radar para  
auxílio na monitorização da Zona Económica  
Exclusiva de Cabo Verde**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia  
Naval Ramo de Armas e Eletrónica**



Alfeite

2023





# ESCOLA NAVAL

*talant de bi-faire*



**Bruno Miguel Monteiro Moniz**

*Desenvolvimento de um simulador radar para auxílio na  
monitorização da Zona Económica Exclusiva de Cabo  
Verde*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo  
de Armas e Eletrónica

**Orientação de:** João Monteiro Felício

*O Aluno Mestrando,*

*O Orientador,*



---

Bruno Moniz

---

João Felício

Alfeite  
2023



“Uma sociedade cresce bem quando as pessoas plantam árvores cuja sombra elas sabem que nunca irão sentar”  
Provérbio Grego



Dedico este trabalho ao meu querido pai, cujo apoio e encorajamento sempre me impulsionaram a alcançar os meus objetivos. A sua constante dedicação à minha jornada académica tem sido minha inspiração.

Também dedico este trabalho ao meu amado país, Cabo Verde, sendo a fonte da minha identidade e motivação. Que este trabalho possa contribuir de alguma forma para o desenvolvimento e crescimento do nosso país. Obrigado a todos que me apoiaram ao longo desta jornada.



# Agradecimentos

Agradeço sinceramente a todas as pessoas, entidades e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho. Em particular, expresso a minha gratidão ao Instituto de Telecomunicações, pela disponibilização de recursos computacionais e software que foram essenciais o desenvolvimento do simulador, as simulações e análises presentes nesta tese. Ao meu orientador e professor, que me guiou nesta jornada académica, o meu sincero agradecimento por partilhar o seu conhecimento e experiência. Agradeço também à minha família e amigos, cujo apoio e encorajamento foram fundamentais ao longo deste percurso. Por fim, quero dedicar um agradecimento especial ao meu país, Cabo Verde, pela inspiração que sempre encontro nas suas tradições e história.



# Resumo

A Guarda Costeira de Cabo Verde, apesar de ter um sistema com diversos meios que auxiliam na monitorização do mar de Cabo Verde, a falta de um sistema radar é uma grande limitação nesse sistema. Partindo da premissa de que existe essa necessidade de ter um sistema radar, surgiu a necessidade de criar uma ferramenta que auxilie no planeamento da instalação desse sistema radar.

O simulador desenvolvido se baseia nos princípios teóricos do radar, nas técnicas de simulação, nos conceitos que envolvem a propagação de RF e usando as ferramentas que o MatLab disponibiliza.

O simulador está destinado a ser utilizado pela guarda costeira de Cabo Verde, permitindo avaliar efetivamente as necessidades de cobertura radar e planejar a implantação de um sistema radar de acordo. Desta forma, este trabalho contribui para a melhoria dos esforços de vigilância marítima e segurança costeira em Cabo Verde.

**Palavras-chave:** Cabo Verde, cobertura Radar, simulador



# Abstract

The Cape Verde Coast Guard, despite having a coastal surveillance system with various means that help monitor the Cape Verde sea, the lack of a radar subsystem is a major limitation. Starting from the premise that there is a need to have a radar system, the need arose to create a tool that assists in planning the installation of this radar system.

The developed simulator is based on theoretical principles of radar, simulation techniques, concepts involving RF propagation and using the tools available in MatLab.

The simulator is intended for use by the Cape Verde Coast Guard, allowing it to effectively assess radar coverage needs and plan the deployment of radar systems accordingly. In this way, this work contributes to the improvement of maritime surveillance and coastal security efforts in Cape Verde.

**Keywords:** Cape Verde,Radar coverage,simulator,



# Índice

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
Motivação . . . . .	2
Objetivos . . . . .	3
Estruturação da tese . . . . .	4
<b>1 Fundamentos Teóricos do Radar</b>	<b>7</b>
1.1 Princípios Básicos do Radar . . . . .	7
1.2 Topologia transmissor-recetor . . . . .	8
1.2.1 Sistema Mono-estático . . . . .	9
1.2.2 Sistema Bi-estático . . . . .	10
1.3 Equação do Radar . . . . .	11
1.3.1 Integração de Impulsos . . . . .	16
1.3.2 Alcance de Detecção . . . . .	17
1.3.3 Equação Radar Sistema Bi-estático . . . . .	18
1.4 Alcance do Horizonte no Radar . . . . .	19
1.4.1 Fundamentos do Alcance do Horizonte no Radar . . . . .	19
1.5 Propagação de Ondas de RF . . . . .	20
1.5.1 Fundamentos da Propagação RF . . . . .	20
1.5.2 Modelos de Propagação de RF . . . . .	21
Modelo de Espaço Livre . . . . .	21
Modelo Longley-Rice . . . . .	21
1.6 Fatores que Influenciam o Desempenho do Radar. . . . .	23
<b>2 Desenvolvimento do Simulador</b>	<b>25</b>
Elipsoide de Fresnel . . . . .	25
A Lógica da Abordagem . . . . .	25
Limitações Encontradas . . . . .	26
A Nova Abordagem . . . . .	26
2.1 Análise dos requisitos do sistema . . . . .	27
2.1.1 Requisitos funcionais . . . . .	28

2.1.2	Utilização do Simulador . . . . .	28
2.1.3	Interface do Utilizador . . . . .	30
2.2	Escolha da Plataforma de Simulação. . . . .	32
2.3	Aquisição e tratamento dos dados . . . . .	33
2.4	Implementação . . . . .	35
2.4.1	Divisão dos módulos . . . . .	35
	<i>monostatic.m</i> . . . . .	36
	<i>bistatic.m</i> . . . . .	37
	<i>distance_dsxr.m</i> . . . . .	38
	<i>melhorRadarSites.m</i> . . . . .	39
	<i>simuladorCobertura2.mlapp</i> . . . . .	39
2.5	Testes do Simulador . . . . .	40
2.5.1	Testes de casos de uso . . . . .	40
2.5.2	Testes de desempenho . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Simulação de Cenários e Análise de Resultados</b>	<b>43</b>
3.1	Caraterísticas dos Sistemas Radares Simulados . . . . .	43
3.2	Cenários . . . . .	46
3.2.1	Cenário 1: Cobertura da Rota Porto Grande-Porto Novo. . .	46
3.2.2	Cenário 2: Cobertura das Rotas Marítimas de Cabo Verde .	50
	<b>Conclusão</b>	<b>54</b>
3.2.3	Discussão . . . . .	55
	<b>Apêndices</b>	<b>61</b>
	<b>A - Lista de Códigos auxiliares</b>	<b>61</b>
A.1	Tratamento dos dados . . . . .	61
A.2	Introduzir dos ficheiros dt2 . . . . .	64
A.3	Remoção dos ficheiros dt2 . . . . .	65
	<b>B - Lista de Códigos que compõem o simulador</b>	<b>67</b>
B.1	<i>monostatic.m</i> . . . . .	67
B.2	<i>bistatic</i> . . . . .	70
B.3	<i>distance_ds</i> . . . . .	73
B.4	<i>distance_dsxr</i> . . . . .	75
B.5	<i>melhorRadarSites</i> . . . . .	78

# Lista de Figuras

1	Zona Económica exclusiva de Cabo Verde . . . . .	1
1.1	Esquema básico do funcionamento do radar . . . . .	7
1.2	Topologia Transmissor-Recetor . . . . .	9
1.3	Potência radiada . . . . .	12
1.4	Ganho da Antena . . . . .	13
2.1	Diagrama UML de casos de uso . . . . .	29
2.2	Interface do Simulador . . . . .	30
2.3	Mensagem de erro do simulador . . . . .	31
2.4	Calculadora de equações de radar . . . . .	32
2.5	SiteViewer . . . . .	33
2.6	Áreas seleccionadas no site EarthExplorer . . . . .	34
2.7	Diagrama de módulos . . . . .	36
3.1	Caraterísticas do radar GEMINI-DB SSR . . . . .	44
3.2	Caraterísticas do radar SENTINEL . . . . .	45
3.3	Cenário 1 - Simulação 1 . . . . .	47
3.4	Cenário 1 - Simulação 2 . . . . .	48
3.5	Cenário 1 - Simulação 3 . . . . .	49
3.6	Mapa de Rotas em Cabo Verde Grupo ETE . . . . .	50
3.7	Cenário 2 - Simulação 1 . . . . .	52
3.8	Cenário 2 - Simulação 2 . . . . .	53
3.9	Cenário 2 - Otimização . . . . .	54



# Lista de Tabelas

3.1	Cenário 1 - Parâmetros dos radares . . . . .	46
3.2	Cenário 1 - Resultado Simulação 1 . . . . .	47
3.3	Cenário 1 - Resultado Simulação 2 . . . . .	48
3.4	Cenário 1 - Resultado Simulação 3 . . . . .	49
3.5	Cenário 2 - Parâmetros dos radares . . . . .	51
3.6	Cenário 2 - Resultado Simulação 1 . . . . .	52
3.7	Cenário 2 - Resultado Simulação 2 . . . . .	53



# Lista de Equações

1.1	Equação Radar . . . . .	11
1.2	Potencia radiada pela antena . . . . .	12
1.4	Ganho da Antena . . . . .	13
1.5	Densidade de Potência . . . . .	13
1.6	Potência Refletida . . . . .	14
1.7	Densidade de Potência no recetor . . . . .	14
1.9	Potencia Recebida . . . . .	14
1.10	Densidade espectral de potência de ruído . . . . .	15
1.11	Temperatura de ruído do radar p . . . . .	15
1.13	Potencia do Ruído . . . . .	15
1.14	Relação Sinal-Ruído(Equação Radar) . . . . .	16
1.16	Numero de Impulsos . . . . .	17
1.17	SNR com Integração de Impulsos . . . . .	17
1.18	Equação Radar da Distancia - Mono-estático . . . . .	18
1.21	Equação Radar da Distancia - Bi-estático . . . . .	18
1.22	Distância Horizonte no vácuo . . . . .	19
2.1	Fórmula de Haversine . . . . .	38



# Lista de Código Fonte

2.1	Função monostatic . . . . .	36
2.2	Função bistatic . . . . .	37
2.3	Função distance . . . . .	38
2.4	Função melhorRadarSites . . . . .	39



# Lista de Símbolos

$A_{eff}$	área efetiva	$m^2$
$A_{esfera}$	área da esfera	$m^2$
$B$	largura de banda do ruído	Hz
$D$	diretividade da antena	dB
$F_n$	fator de ruído	
$G_r$	ganho da antena recetora	dB ou W/W
$G_t$	ganho da antena transmissora	dB ou W/W
$k_B$	constante de Boltzman	$1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
$L$	perdas do sistema	dB ou W/W
$L_t$	perdas do transmissor	dB ou W/W
$N_0$	potência de ruído	W/Hz
$n_{imp}$	número de impulsos	
$P_N$	potência do ruído	W
$P_r$	potência recebida	W
$P_s$	potência refletida	W
$P_t$	potência de pico	W
$P_{rad}$	potência radiada	W
$PRF$	frequência de repetição de pulso	Hz
$R$	distância	m
$R_{rx}$	distância entre o alvo e a antena recetora	m

$R_{tx}$	distância entre o alvo e a antena transmissora	m
$S_i$	densidade de potência, no alvo	W/m <sup>2</sup>
$S_r$	densidade de potência, no recetor	W/m <sup>2</sup>
$SNR$	relação sinal-ruído	dB ou W/W
$T_{ilum}$	tempo de iluminação	s
$T_s$	temperatura de ruído	K
$T_0$	temperatura de referência	K
$\eta$	eficiência da antena	%
$\lambda$	comprimento de onda	m
$\sigma$	secção transversal de dispersão	m <sup>2</sup>
$\sigma_b$	secção transversal de dispersão no sistema bi-estático	m <sup>2</sup>
$\tau_p$	largura de pulso	$\mu$ s
$\theta_{BW}$	largura de feixe	rad
$\dot{\theta}$	velocidade angular	rad/s

# Lista de Acrónimos

AIS	Automatic Identification System.
ARM	Anti-Radiation Missile.
COSMAR	Centro de Operações de Segurança Marítima.
DTE	Digital Terrain Elevation.
FACV	Forças Armadas de Cabo Verde.
GCCV	Guarda Costeira de Cabo Verde.
GUI	Graphical User Interface.
HF	High frequency.
IF	Intermediate Frequency.
ITM	Irregular Terrain Model.
IUU	Illegal, Unreported and Unregulated fishing.
RADAR	RADio Detection And Ranging.
RCS	Radar Cross Section.

RF	Radio Frequency.
SAR	Search And Rescue.
VHF	Very High frequency.
VMS	Vessel Monitoring System.

# Introdução

O sistema de vigilância costeira de Cabo Verde é uma parte integral das operações de segurança marítima do país. Cabo Verde tem uma extensão territorial de 4.033 km<sup>2</sup>, uma linha costeira de aproximadamente 1.000 km, uma zona económica exclusiva de 734.265 km<sup>2</sup> e uma zona de busca e salvamento (SAR) de aproximadamente 645.000 km<sup>2</sup>.



FIGURA 1: Zona Económica exclusiva de Cabo Verde. Fonte: <https://www.marineregions.org/eezmapper.php>

Conforme o Decreto-Regulamentar n.º 5/2009, de 26 de janeiro, a Guarda Costeira de Cabo Verde (GCCV), sendo uma componente das Forças Armadas de Cabo Verde (FACV), é responsável pela defesa e proteção dos interesses económicos do país nas águas sob jurisdição nacional. Além disso, tem a responsabilidade de garantir a salvaguarda da vida humana no mar e operacionalizar os compromissos resultantes da ratificação de tratados internacionais pelo estado de Cabo Verde.

O Centro de Operações de Segurança Marítima (COSMAR), coordenado pela GCCV, é um órgão que planeia e executa operações no domínio da segurança

marítima nas águas sob jurisdição nacional e na zona económica exclusiva. O COSMAR utiliza uma variedade de ferramentas e equipamentos para a vigilância marítima, incluindo comunicações por rádio (HF, VHF), telefone e fax, sistemas usam AIS para funcionar, *Sea Vision* e TV32, além de um sistema de monitorização de embarcações de pesca (VMS). No entanto, o COSMAR não conta com um sistema de RADAR que auxilie na vigilância marítima em tempo real sem a necessidade da existência de outros sistemas instalados nas embarcações, como o AIS.

Os sistemas de radar costeiro são uma peça fundamental para a vigilância marítima eficiente, fornecendo uma visão contínua e abrangente da atividade marítima numa região. A sua falta limita a capacidade do COSMAR de identificar embarcações desconhecidas, monitorizar em tempo real as rotas de navegação, detetar atividades suspeitas e identificar possíveis ameaças à segurança marítima.

Portanto, fica evidente que a ausência de um sistema de radar costeiro é uma limitação significativa nas operações do COSMAR. A incorporação de um sistema de radar costeiro permitiria uma vigilância marítima mais abrangente, melhorando a capacidade de deteção e resposta a incidentes, garantindo a segurança das águas sob jurisdição nacional e contribuindo para a segurança marítima geral da região.

## Motivação

A segurança marítima é uma das principais preocupações para Cabo Verde, dada a sua localização estratégica e a extensa área marítima que o país tem sob a sua jurisdição. O tráfico ilícito de drogas, a pirataria, a pesca ilegal, não declarada e não regulamentada (IUU), bem como a ameaça do terrorismo marítimo, são desafios contínuos que a Guarda Costeira de Cabo Verde precisa enfrentar.

Um sistema de radar costeiro pode desempenhar um papel crucial na deteção e rápida resposta a estas ameaças. Isso permitirá uma melhor proteção das águas territoriais de Cabo Verde, bem como a segurança da sua população e infraestrutura marítima.

Além dos aspetos de segurança, um sistema de radar costeiro pode ter um impacto significativo nos aspetos económicos e ambientais da gestão marítima de Cabo Verde. A economia de Cabo Verde é fortemente dependente das riquezas marítimas, incluindo a pesca e o turismo. Um sistema de radar costeiro pode ajudar a proteger esses recursos, detetando atividades ilegais como a pesca IUU (ilegal, não regulamentada e não declarada), ajudando a garantir a sustentabilidade dos recursos marinhos, possibilita, também, a rápida resposta em situações emergências, como

desastres naturais, colisões de navios ou acidentes ambientais. Ao detetar anomalias ou comportamentos fora do padrão, o radar permite que as autoridades marítimas ajam prontamente, minimizando os danos causados e implementando medidas de mitigação adequadas.

Outra motivação para a criação do simulador é a necessidade de adaptar as especificações do radar às características geográficas, climáticas e económicas específicas de Cabo Verde. A geografia do arquipélago é marcada por ilhas vulcânicas, montanhas e áreas costeiras, influenciando diretamente a propagação das ondas eletromagnéticas. As variações de terreno, como picos e vales, podem gerar zonas de sombra, interferindo na cobertura efetiva do radar.

Outro fator importante é a disponibilidade de recursos e a realidade económica de Cabo Verde. As limitações de infraestrutura e os custos associados ao planeamento, instalação e manutenção de sistema radar são elementos-chave a serem considerados. O simulador permite avaliar diferentes configurações e estratégias de implantação, considerando as restrições económicas específicas do país.

Em suma, a motivação para o desenvolvimento de um simulador radar é a necessidade de se implementar um sistema de radar costeiro em Cabo Verde, sistema esse que se mostrou de extrema importância para a segurança e economia de Cabo Verde. O desenvolvimento de um simulador de radar para auxiliar no planeamento e implementação deste sistema é, portanto, uma contribuição valiosa para a segurança e sustentabilidade de Cabo Verde.

## **Objetivos**

O objetivo geral desta tese é desenvolver um simulador de cobertura radar que permita analisar as necessidades de cobertura radar em áreas marítimas, com foco específico em Cabo Verde. O simulador será projetado para auxiliar a Guarda Costeira de Cabo Verde a tomar decisões estratégicas relacionadas à implementação de sistemas de radar, considerando as características geográficas e ambientais do arquipélago.

### **Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

**Analisar as necessidades de cobertura radar em Cabo Verde:** O primeiro objetivo é analisar as necessidades de cobertura radar em Cabo Verde,

considerando as características geográficas, ambientais e às exigências específicas da Guarda Costeira. Isso permitirá identificar áreas críticas e propor estratégias eficientes para a implantação de sistemas de radar, visando aprimorar a segurança marítima no arquipélago.

**Desenvolver um simulador de cobertura radar:** O segundo objetivo consiste em desenvolver um ambiente iterativo que permita ao utilizador introduzir alguns parâmetros de um sistema radar e apresentar a simulação da sua cobertura de forma clara e precisa. O simulador deve permitir considerar variáveis como o terreno, condições de propagação e perdas de sinal, de modo a fornecer resultados próximos da realidade.

**Avaliar o desempenho do simulador por meio de estudos de caso:** O terceiro objetivo é realizar estudos de caso utilizando o simulador desenvolvido. Nesses estudos de caso serão usados dados e configurações que se aproximam das condições geográficas e climáticas de Cabo Verde, e servirão para avaliar a precisão e eficácia do simulador na análise das necessidades de cobertura radar em áreas marítimas específicas.

**Avaliar a aplicabilidade do simulador em outros contextos:** O quarto objetivo é avaliar a aplicabilidade do simulador desenvolvido em outros contextos além de Cabo Verde. Serão exploradas possíveis adaptações e generalizações do simulador para diferentes regiões geográficas e condições ambientais, de modo a expandir a sua utilidade e relevância para outras comunidades costeiras.

**Identificar oportunidades de aprimoramento do simulador:** O último objetivo é identificar oportunidades de aprimoramento do simulador, considerando as limitações e desafios encontrados durante o desenvolvimento e aplicação. Serão analisados os pontos fortes e fracos do simulador, de modo a propor melhorias e otimizações que aumentem a sua precisão, confiabilidade e eficiência.

A conquista desses objetivos contribuirá para o avanço do conhecimento na área de cobertura radar em ambientes marítimos, fornecendo uma ferramenta de análise e tomada de decisão para a Guarda Costeira de Cabo Verde e outros profissionais envolvidos na segurança marítima. Além disso, o simulador desenvolvido poderá ser adaptado para diferentes regiões e aplicado em outros contextos.

## **Estruturação da tese**

A tese está estruturada da seguinte forma:

**Introdução:** Nesse capítulo é feita uma introdução ao tema da tese, fornecendo uma visão geral do objetivo do trabalho, das motivações e da sua relevância para Cabo Verde. Além disso, o capítulo também apresenta a estruturação da tese, delineando os capítulos subsequentes.

**Capítulo 1 - Fundamentos Teóricos do Radar:** Neste capítulo, são discutidos os fundamentos teóricos do radar e da propagação de ondas eletromagnéticas. São abordados tópicos como a topologia básica dos radares, a equação do radar e os princípios de propagação das ondas. O capítulo também discute os fatores que influenciam o desempenho do radar.

**Capítulo 2 - Desenvolvimento do Simulador:** Este capítulo detalha todo o processo de desenvolvimento do simulador de cobertura radar. São abordados aspectos como o planeamento, a escolha da plataforma, a aquisição de dados e o design do simulador. Além disso, são apresentadas as principais funções utilizadas no simulador e discutida a sua operação e funcionalidade.

**Capítulo 3 - Simulação de Cenários e Análise de Resultados:** Neste capítulo, são realizadas simulações utilizando o simulador desenvolvido. São explorados diferentes casos de estudo para avaliar a confiabilidade dos resultados gerados. A simulação é realizada com base nos dados básicos fornecidos pelo utilizador e configurações variadas das propriedades das funções. A análise dos resultados obtidos é discutida em detalhes.

**Apêndice:** O apêndice contém os códigos das funções que ajudaram a desenvolver o simulador.



# Capítulo 1

## Fundamentos Teóricos do Radar

Este capítulo visa introduzir os princípios fundamentais básicos do radar e da propagação de ondas eletromagnéticas de modo a preparar o terreno para a modelação do simulador proposto no trabalho. Nos subcapítulos seguintes, será feita uma abordagem à topologia básica dos radares, à equação do radar, ao alcance do horizonte radar, à propagação das ondas eletromagnéticas e no final será feito um resumo dos fatores que influenciam o desempenho do radar.

### 1.1 Princípios Básicos do Radar

O radar, sigla em inglês para “RADio Detection And Ranging”, é um sistema eletrônico que usa a propagação de ondas eletromagnéticas e tecnologia de comunicação para realizar medições de distância, ângulo e/ou velocidade em alvos de interesse (Seybold, 2005).

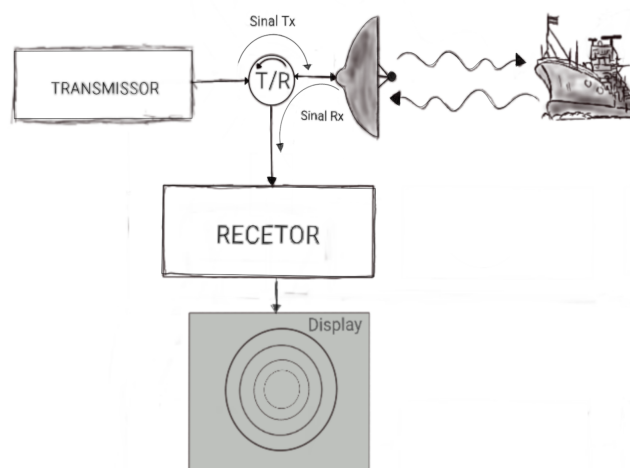


FIGURA 1.1: Esquema básico do funcionamento do radar monoestático

A figura 1.1 ilustra o funcionamento básico de um sistema radar moderno. A detecção de um alvo por um radar é um processo sequencial que se inicia com o sinal de rádio frequência gerado pelo transmissor e radiado na atmosfera pela antena (Skolnik, 2008).

Esse sinal é direcionado para a área de interesse. Quando este encontra um objeto, parte da energia é refletida de volta em direção à antena. O dispositivo T/R do radar, alterna rapidamente para o modo de recepção após a transmissão, garantindo o isolamento entre o transmissor e o receptor, isolamento este que protege os componentes sensíveis do receptor de sinais de alta potência e permitindo a detecção do eco do sinal refletido pelo objeto (Richards, Scheer, Holm & Melvin, 2010).

O eco do sinal interceptado pela antena é enviado aos componentes do receptor. Os componentes do receptor amplificam o sinal recebido, convertem o sinal de RF recebido numa frequência intermediária (IF), em seguida, o sinal é aplicado a um conversor analógico-digital (conversor A/D) e depois ao processador de sinal/dados de modo a determinar a posição e a distância do objeto que causou a reflexão. (Skolnik, 2008)

Para determinar se o eco é realmente um alvo, o processador de sinal aplica um limiar de detecção. Se o eco exceder esse limiar, o sistema considera que um alvo foi detectado. Em sistemas de rastreamento, a posição do alvo é atualizada ao longo do tempo para rastrear o seu movimento.

Finalmente, as informações relevantes sobre o alvo, como posição e velocidade, são apresentadas numa tela ou monitor para o operador do radar. Esse processo permite que o radar detecte e rastreie objetos numa área definida, desempenhando um papel fundamental em aplicações que variam desde navegação segura até vigilância costeira e monitorização de tráfego marítimo. (Skolnik, 2008)

## 1.2 Topologia transmissor-receptor

Os sistemas de radar são geralmente classificados como mono-estáticos ou bi-estáticos, dependendo da localização relativa dos seus transmissores e receptores.

Neste trabalho será abordado a configuração mono-estática e bi-estática, as suas principais características e as suas respetivas implementações no simulador.

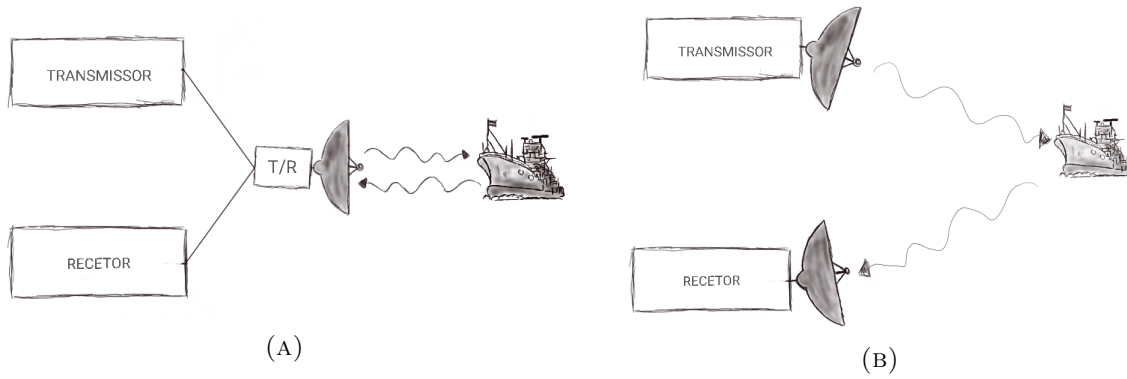


FIGURA 1.2: (A) Configuração mono-estática, (B) Configuração bi-estática

### 1.2.1 Sistema Mono-estático

Num sistema radar mono-estático, o transmissor e o recetor estão localizados no mesmo lugar, por sua vez a transmissão e a receção pode ser feito por uma única antena, isso é possível devido ao dispositivo T/R que alterna a antena entre modo de transmissão e receção. De modo a evitar o uso do dispositivo T/R, existem radares mono-estáticos que usam duas antenas, uma para transmissão e outra para receção, mas estas devem estar o mais próximo possível de modo que a distância dos dois em relação ao alvo seja igual (Richards, Scheer, Holm & Melvin, 2010).

Uma das principais vantagens do sistema mono-estático é a sua facilidade de implementação e manutenção. Como o transmissor e o recetor estão localizados no mesmo lugar, não é necessária uma infraestrutura adicional para a comunicação entre os componentes. Além disso, a configuração mono-estática permite uma maior precisão na localização de alvos, uma vez que o transmissor e o recetor estão posicionados no mesmo ponto de referência (Richards, Scheer, Holm & Melvin, 2010).

No entanto, o radar mono-estático apresenta algumas limitações. Um dos principais desafios é a maior ocorrência de áreas de sombra. Essas áreas ocorrem quando o sinal transmitido é bloqueado por obstáculos, como montanhas e prédios, impedindo que o recetor receba o sinal refletido do alvo. Isso pode resultar em áreas de sombra onde a deteção de alvos é comprometida. Além disso, o sistema mono-estático possui um alcance limitado em comparação ao sistema bi-estático. Isso ocorre porque o sinal de radar precisa viajar duas vezes a distância até o alvo e retornar. Portanto, o alcance efetivo do sistema mono-estático é reduzido relativamente ao sistema bi-estático, que pode explorar ângulos de iluminação e geometrias

de posicionamento mais favoráveis devido à separação entre o transmissor e o receptor (Richards, Scheer, Holm & Melvin, 2010).

Outra desvantagem do sistema mono-estático é a vulnerabilidade a ataques de mísseis antirradiação (ARM). Como o transmissor está localizado no mesmo ponto que o receptor, torna-se mais fácil para os mísseis detectarem e direcionarem-se para a fonte de radiação, colocando o radar em risco (Meikle, 2008).

Apesar dessas limitações, os sistemas mono-estáticos continuam a ser amplamente utilizados nos sistemas de vigilância costeira devido à sua simplicidade e baixo custo de implementação.

## 1.2.2 Sistema Bi-estático

Num radar bi-estático, o transmissor e o receptor estão localizados em lugares diferentes, com uma distância significativa a separar os dois componentes. Existem principalmente duas razões para colocar um transmissor de radar com a sua antena transmissora e o receptor com a sua antena em duas localizações diferentes, sendo eles, a falta de dispositivos de comutação T/R adequados com isolamento suficiente que garanta a proteção do receptor e pelo facto dos altos custos associados aos transmissores, sendo esse o motivo que levou ao uso de ecos de transmissores distantes para detetar alvos (Meikle, 2008).

O sistema bi-estático tem algumas vantagens relativamente ao sistema mono-estático, por exemplo, no meio militar é amplamente usado para escapar dos mísseis antirradiação (ARM) que foram desenvolvidos para buscar e destruir fontes radiantes, como os transmissores. Do mesmo modo, devido à separação entre o transmissor e o receptor, é mais difícil o alvo passar despercebido pelo radar, diminuindo a capacidade *stealth* do alvo (Richards, Scheer, Holm & Melvin, 2010).

Outra vantagem é o seu uso no meio civil, onde é possível usar apenas um radar passivo local para dar uma melhor cobertura em áreas onde a cobertura de um radar primário não é adequada (Meikle, 2008).

No entanto, é importante destacar que o sistema bi-estático também possui algumas limitações. Devido à separação física entre o transmissor e o receptor, o sistema bi-estático requer uma infraestrutura de comunicação adicional para a troca de informações entre os componentes. Além disso, a necessidade de coordenar a operação de múltiplas antenas e a sincronização precisa dos sinais podem adicionar complexidade ao sistema.

Em resumo, os dois sistemas, bi-estático e mono-estático, oferecem vantagens e desvantagens e escolha entre os dois dependerá das necessidades e objetivos específicos de cada aplicação.

## 1.3 Equação do Radar

Uma das formas mais úteis de compreender os elementos que afetam o desempenho de um radar é por meio da chamada “equação do radar”. Essa equação relaciona o alcance de um radar com as características específicas do próprio sistema radar, permitindo uma compreensão mais clara dos fatores que influenciam a eficácia das detecções realizadas pelo radar (Skolnik, 2008).

Começamos por apresentar a forma básica da equação radar como sendo:

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau_p}{(4\pi)^3 R^4 k_B T_s L} \quad (1.1)$$

- $SNR$  é a relação sinal-ruído.
- $P_r$  é a potência do sinal recebida num recetor, dado em Watt.
- $P_N$  é a potência do ruído do mesmo recetor em que  $P_r$  se encontra.
- $P_t$  é a potência de pico de transmissão em Watt.
- $G_t$  é o ganho da antena transmissora.
- $G_r$  é o ganho da antena recetora.
- $\lambda$  é o comprimento de onda em metros.
- $\sigma$  é a secção eficaz de dispersão em  $m^2$ .
- $\tau_p$  é a largura do pulso em  $s$ .
- $R$  é a distância entre a antena e o alvo em metros.
- $k_B$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} [J \cdot K^{-1}]$ ).
- $T_s$  é a temperatura de ruído do sistema ( $T_s = T_0 F$ ).
- $L$  é o somatório de todas as perdas.

Primeiramente analisaremos a potência gerada na secção de transmissão do radar e que percorre toda a guia de onda<sup>1</sup> até a antena.

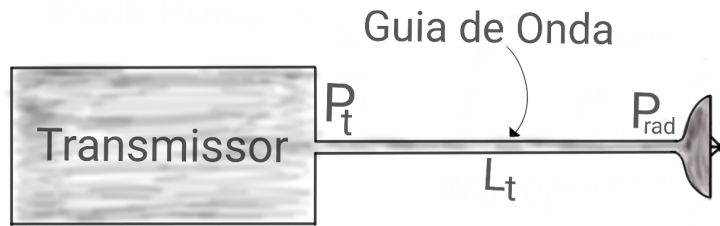


FIGURA 1.3: Potencia radiada pela antena

A potência gerada pelo transmissor é a potência máxima  $P_t$ . Devido às perdas associadas aos circuitos de transmissão  $L_t$ , incluindo os guias de onda, a potência máxima não chega na sua totalidade à antena de transmissão. Com isso é válido afirmar que a potência que chega na antena de transmissão é dada por:

$$P_{rad} = \frac{P_t}{L_{ant}}, [W] \quad (1.2)$$

- $P_{rad}$  Potencia que chega na antena de transmissão.
- $P_t$  Potência de pico gerado pelo transmissor.
- $L_t$  Perdas associados aos circuitos do transmissor.

Considere-se um radiador isotrópico<sup>2</sup> que radia energia uniformemente em todas as direções, criando assim, uma esfera em torno de si mesma onde a densidade de potência é uniforme ao longo de todos os seus pontos. Devido às propriedades do radiador isotrópico, a densidade de potência,  $S_i$ , (potência por unidade de área) ao longo da esfera é inversamente proporcional ao quadrado do raio  $R$  da esfera, sendo dada por:

$$S_i = \frac{P_t}{4\pi R^2 L_t}, [W/m^2] \quad (1.3)$$

<sup>1</sup>Guias de onda são estruturas usadas para transmitir as ondas eletromagnéticas de alta frequência de um ponto para outro, nesse caso do transmissor até a antena. (Sophocles, 2003)

<sup>2</sup>Um radiador isotrópico é uma fonte teórica que emite radiação igualmente em todas as direções. Usado como referência na medição do ganho de antenas, não pode ser construído na prática.

### 1.3. Equação do Radar

---

No entanto, na prática, a antena do transmissor não radia energia uniformemente em todas as direções, mas sim com um padrão de radiação específico. Isso é descrito pelo ganho da antena do transmissor ( $G_t$ ).

O ganho da antena,  $G_t$ , é uma métrica que descreve o quão eficaz é a antena em direcionar a energia numa determinada direção. É o produto da eficiência e da diretividade.

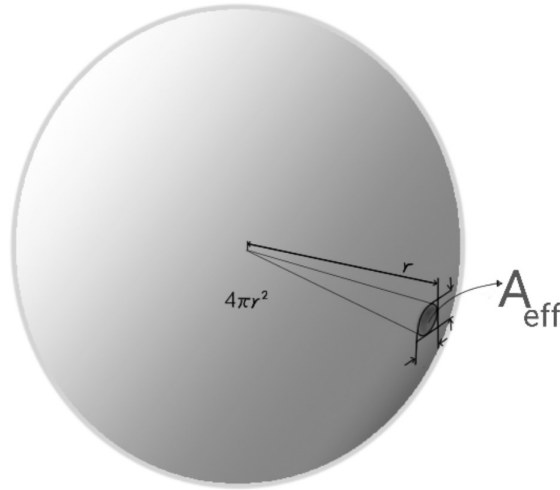


FIGURA 1.4: Ganho da Antena

$$G_t = D\eta = \frac{A_{\text{esfera}}}{A_{\text{eff}}}\eta \quad (1.4)$$

- $G_t$  Ganho da antena de transmissão.
- $D$  Diretividade da antena.
- $\eta$  Eficiência da antena.

Com a adição do ganho da antena,  $G_t$ , podemos determinar a densidade de potência num determinado alcance  $R$ :

$$S_i = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2 L_t}, [W/m^2] \quad (1.5)$$

Após a energia ser radiada pela antena, esta desloca ao longo do espaço até encontrar um alvo que se encontra a uma distância  $R$ . A área do alvo no qual a energia reflete é a seção eficaz de dispersão ( $RCS$ ),  $\sigma$ , sendo o limite da

potência dispersa na direção da antena sobre a potência incidente, isso assumindo que o alvo é comporta como um radiador isotrópico. Tendo em conta a secção eficaz de dispersão, temos que a potência refletida pelo alvo é dada por:

$$P_s = S_i \sigma = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2 L_t} \sigma, [W] \quad (1.6)$$

Deve-se ter em conta que a presença do ganho da antena é a consequência da radiação da antena e não do alvo, ou seja, não existe direcionamento da potência por parte do alvo.

Como foi dito anteriormente, a densidade de potência na superfície de uma esfera é inversamente proporcional ao quadrado do raio da esfera, isso porque ao refletir a potência o alvo funciona como um radiador. Com isso podemos determinar a densidade de potência que chega no recetor,  $S_r$ :

$$S_r = \frac{P_s}{4\pi R^2} = \frac{P_t G_t}{(4\pi)^2 R^4 L_t} \sigma, [W/m^2] \quad (1.7)$$

A potência recebida pelo recetor depende da densidade de potência nesse ponto e da área efetiva da antena recetora,  $A_{eff}$ , que, por sua vez, depende do ganho do recetor,  $G_r$ , como é mostrado a seguir:

$$P_r = S_r A_{eff}, \text{ em que } A_{eff} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}, [W] \quad (1.8)$$

Com as perdas do transmissor, das antenas de transmissão e receção e do recetor, usemos a variável  $L$  que representa todas essas perdas. Conhecendo a densidade de potência na antena do recetor e a área efetiva dessa antena, temos que:

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow P_r &= \frac{P_s}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} [W] \\ \Leftrightarrow P_r &= \frac{P_t G_t}{4\pi R^2 L} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}, [W] \\ \Leftrightarrow P_r &= \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \sigma, [W] \end{aligned} \quad (1.9)$$

Os recetores geram ruídos internos que mascaram os ecos mais fracos recebidos através da antena do radar (Skolnik, 2008). Esses ruídos são gerados devido à agitação de elétrons, causado pelo calor presente nos circuitos do recetor (Budge & German, 2020). Outra fonte de ruídos que afeta o desempenho radar é o ambiente a volta do radar, como o Sol e interferências de outros sistemas, sendo que estes últimos são filtrados no recetor.

O desenvolvimento da equação radar, nesse caso, aborda apenas o ruído térmico provocado pela agitação de elétrons nos circuitos do recetor.

Inicialmente, partimos do pressuposto de que o ruído no radar é considerado “branco”. Nesse sentido, descrevemos o ruído em termos da sua densidade espectral de potência ou energia, que são equivalentes nesse contexto (Budge & German, 2020). A densidade espectral do ruído no radar é dada pela equação:

$$N_0 = kT_s \quad (1.10)$$

Em que  $k$  é o constante de Boltzman e  $T_s$  é representa a temperatura de ruído do radar em graus Kelvin ( $^{\circ}k$ ).

A temperatura de ruído do radar pode ser escrito como sendo:

$$T_s = F_n T_0 \quad (1.11)$$

Com base nas equações acima, podemos estabelecer a relação:

$$N_0 = k_B F_n T_0 \quad (1.12)$$

Para converter a densidade espectral de potência de ruído ( $N_0$ ) numa potência real, precisamos multiplicá-la por um termo de frequência, uma vez que  $N_0$  possui unidades de W/Hz. Assim, a potência do ruído no radar ( $P_N$ ) é expressa como:

$$P_N = k_B T_s B = k_B T_0 F_n B \quad (1.13)$$

A faixa de frequências para as quais o radar é suscetível a sinais de ruído é determinada pela largura de banda do recetor,  $B$ , com isso, a potência do ruído térmico é proporcional a  $B$ .

- $k_B$  - Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} [J \cdot K^{-1}]$ ).
- $T_s$  - temperatura de ruído do radar ( $T_s = T_0 F$ ).
- $B$  - Largura de banda de ruído efetiva do radar  $B = \frac{1}{\tau_p}$ .
- $T_0$  - Temperatura de referência ( $K$ ).
- $F_n$  - Fator de ruído (sem unidade).

Com isso conseguimos chegar na equação 1.1 apresentada no início do sub-capítulo:

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau_p}{(4\pi)^3 R^4 k_B T_s L} \quad (1.14)$$

$$SNR = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\tau_p}{k_B T_s} \cdot \sigma \quad (1.15)$$

### 1.3.1 Integração de Impulsos

A integração de impulsos é um processo utilizado em sistemas de radar para melhorar a relação sinal-ruído. Consiste em combinar várias amostras do sinal recebido, acompanhadas de ruído ou interferência independente, de modo a aumentar a probabilidade de detecção do sinal alvo (David, 1998). Existem duas abordagens principais para a integração de impulsos: coerente e não coerente.

Num sistema coerente, as amostras sucessivas do sinal têm coerência de fase, ou seja, a fase do sinal é preservada e não sofre variações significativas ao longo do tempo ou entre as amostras. Nesse caso, a integração pode ser realizada antes da detecção de envolvente. Esse tipo de integração é chamado de integração coerente ou pré-deteção. A integração coerente permite aproveitar as informações de fase do sinal, o que pode fornecer mais informações que melhoram a discriminação entre sinais e reduz a taxa de erro de detecção. (David, 1998).

Por outro lado, num sistema não coerente, não há coerência de fase entre as amostras do sinal. Nesse caso, as amostras do sinal passam por um detetor de envolvente antes de serem combinadas. Essa abordagem é conhecida como integração

não coerente, pós-deteção ou de vídeo. A integração não coerente é mais simples e não requer a sincronização precisa dos osciladores locais. No entanto, a integração não coerente não utiliza as informações de fase do sinal, por isso não tem o mesmo desempenho na deteção que uma integração coerente (David, 1998).

Uma das vantagens da integração de impulsos é a redução dos falsos alarmes, já que a soma dos sinais do alvo aumenta a confiabilidade da deteção. Além disso, a integração permite a deteção de alvos de baixa potência ou ocultos no ruído, melhorando a sensibilidade do sistema. No entanto, a integração também introduz um atraso no tempo de deteção, o que pode ser um desafio em cenários de alta velocidade (Richards, Scheer, Holm & Melvin, 2010).

Como foi dito anteriormente, ao integrar múltiplos impulsos, o radar pode aumentar a probabilidade de deteção, reduzindo assim a taxa de falsos alarmes e melhorando a confiabilidade do sistema.

O número de impulsos que atingem o alvo em cada varrimento é dado por:

$$n_{imp} = T_{ilum}PRF = \frac{\theta_{BW}PRF}{\dot{\theta}} \quad (1.16)$$

Em que  $n_{imp}$  é o número de impulsos que atingem o alvo em cada varrimento,  $\theta_{BW}$  é a largura de feixe (*beamwidth*) em graus e  $\dot{\theta}$  é a velocidade de rotação da antena em *rad/s*.

Assim sendo, temos que a equação do radar com integração de impulsos é dado por:

$$SNR_{int} = SNR_1 n_{imp} \quad (1.17)$$

Em que  $SNR_1$  é a relação sinal-ruído para um único impulso.

#### 1.3.2 Alcance de Deteção

Um dos usos da equação radar é na determinação do alcance de deteção ou alcance máximo em que um alvo tem uma determinada probabilidade de ser detetado pelo radar (Budge & German, 2020). Para detetar um alvo é necessário que  $SNR$  esteja acima de um certo valor limite, valor esse normalmente chamado de  $SNR$  de limiar. Se considerarmos a equação 1.15, notamos que o  $SNR$  varia inversamente

com a quarta potência do alcance, ou seja, se o  $SNR$  tiver um determinado valor a uma determinada distância, para uma distância menor o valor de  $SNR$  será maior. Com isso, definimos o alcance de detecção como o alcance no qual alcançamos um certo  $SNR$ .

Para encontrar a equação do alcance de detecção, resolvamos a equação 1.15 em função de  $R$ , com isso temos que:

$$R = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau_p}{SNR_{int} (4\pi)^3 k_B T_s L} \right)^{1/4} \quad (1.18)$$

### 1.3.3 Equação Radar Sistema Bi-estático

A equação radar anterior é referente a sistemas mono-estáticos, caracterizados pelo uso de uma única antena para transmissão e recepção do sinal.

No entanto, quando o sistema de radar é bi-estático, ou seja, o transmissor e o recetor estão localizados em locais diferentes, a equação radar é ligeiramente diferente. Nesse caso, a distância máxima detetável é calculada como a média geométrica das distâncias do alvo ao transmissor e ao recetor, representadas por  $R_{tx}$  e  $R_{rx}$  respetivamente. Portanto, a equação radar para um sistema bi-estático é dada por:

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b \tau_p}{(4\pi)^3 R_{tx}^2 R_{rx}^2 k_B T_s L} \quad (1.19)$$

$$R_{tx}^2 R_{rx}^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b \tau_p}{SNR_{int} (4\pi)^3 k_B T_s L} \quad (1.20)$$

$$\sqrt{R_{tx} R_{rx}} = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b \tau_p}{SNR_{int} (4\pi)^3 k_B T_s L} \right)^{1/4} \quad (1.21)$$

A equação do radar é a principal ferramenta de análise e avaliação de sistemas de radar, e um entendimento aprofundado dela é crucial para a conceção e operação eficaz de tais sistemas. No entanto, também é importante lembrar que ela representa uma aproximação idealizada e que, na realidade, outros fatores como o ambiente à volta, interferências de outros sinais, a qualidade dos componentes, as

características dos alvos e a capacidade de processamento de dados influenciam no desempenho do sistema de radar.

## 1.4 Alcance do Horizonte no Radar

O alcance do horizonte no radar é um conceito fundamental na operação e interpretação de dados de radar, com amplas implicações em diversos campos, incluindo a aviação, marinha e meteorologia. Este capítulo faz a abordagem desse fenômeno, considerando a altura da antena, curvatura da Terra e a altura do alvo.

### 1.4.1 Fundamentos do Alcance do Horizonte no Radar

O alcance do horizonte no radar é o ponto onde a linha de visão entre a antena do radar e o alvo é bloqueada pelo horizonte da Terra. Considerando que as ondas radiadas pelo radar seguem uma trajetória de linha de visão, o que significa que a detecção de alvos depende significativamente da posição relativa entre a antena do radar e o horizonte. Em outras palavras, um alvo não será detectado se estiver localizado abaixo do horizonte do radar, independentemente da potência do pulso do radar ou da capacidade do alvo de retornar um sinal detectável (Bole, Wall & Norris, 2013).

Considerando o vácuo como ambiente de propagação, a distância até o horizonte do radar é calculada usando a fórmula:

$$R_h = 3.57\sqrt{h_{tx}h_{rx}} \quad (1.22)$$

Em que  $R_h$  é o alcance horizonte da antena em  $km$ ,  $h_{tx}$  é a altura da antena transmissora em metros e  $h_{rx}$  é a altura do alvo em metros.

A curvatura da Terra é um fator importante a ser considerado, pois a distância até o horizonte varia dependendo da curvatura local da superfície da Terra.

Embora teoricamente seja possível aumentar o alcance de detecção do radar aumentando a altura da antena, há limitações práticas a serem consideradas. O aumento significativo da altura da antena resulta em ganhos marginais no alcance de detecção. Por exemplo, dobrar a distância até o horizonte do radar requer que a antena seja quatro vezes mais alta, podendo não ser viável em muitas situações (Bole, Wall & Norris, 2013).

A aplicação desse conceito no trabalho envolve calcular a distância máxima de detecção para diferentes configurações de antenas e cenários de simulação. Isso significa que, ao definir as alturas das antenas Tx, Rx e do alvo no simulador, o sistema considerará automaticamente a curvatura da Terra para determinar até onde os sinais de radar podem viajar antes de serem obstruídos pela curvatura.

## 1.5 Propagação de Ondas de RF

Compreender como as ondas de rádio se propagam através do espaço, ou seja, a propagação de radiofrequência (RF), é fundamental no desenvolvimento e planeamento de sistemas de radar. A detecção de alvos por um radar está diretamente ligado à forma como essas ondas de rádio interagem e propagam no ambiente. Em Cabo Verde, devido à sua topografia e às condições atmosféricas, a propagação de RF pode ser significativamente influenciada, impactando a cobertura efetiva do radar. Nesta secção, é abordado os conceitos essenciais da propagação de RF e como eles se aplicam ao nosso simulador de cobertura de radar.

### 1.5.1 Fundamentos da Propagação RF

A propagação de RF envolve a transmissão de ondas de rádio de uma antena transmissora para uma antena recetora. Vários fatores podem influenciar a maneira como essas ondas de rádio viajam, incluindo a frequência da onda de rádio, a altura e o tipo da antena, a topografia do terreno e as condições atmosféricas (Seybold, 2005).

Alguns fenómenos como a difração, a refração e a reflexão podem acontecer durante a propagação de RF devido aos fatores mencionados no parágrafo anterior.

A difração ocorre quando uma onda de rádio encontra um obstáculo no caminho da sua propagação, fazendo com que a onda se curve em torno do obstáculo. Isso permite que o sinal seja recebido mesmo quando o recetor não está diretamente na linha de visão do transmissor, sendo particularmente relevante em ambientes com terrenos irregulares ou montanhosos. A refração é o fenómeno que ocorre quando uma onda de rádio passa de um meio para outro, causando uma mudança na direção da onda. No contexto da propagação de RF, a refração pode ocorrer quando a onda de rádio passa por diferentes camadas da atmosfera com diferentes índices de refração, permitindo que as ondas de rádio viajem além do horizonte e aumentem o alcance do sinal de rádio. Por fim, a reflexão ocorre quando uma onda de rádio encontra uma superfície grande, em comparação com o seu comprimento de onda,

fazendo com que seja refletida. A reflexão pode causar *multipath fading*, em que várias cópias do mesmo sinal chegam ao recetor em momentos ligeiramente diferentes, causando interferência(Seybold, 2005).

### 1.5.2 Modelos de Propagação de RF

Existem vários modelos de propagação de RF que podem ser usados para prever a maneira como as ondas de rádio se propagam num ambiente específico. Alguns desses modelos consideram fatores como a frequência da onda de rádio, a altura da antena, a distância entre as antenas e as características do terreno, o que teria maior utilidade para o que se pretende principalmente se considerarmos a geografia de Cabo Verde.

#### Modelo de Espaço Livre

O modelo de propagação de espaço livre é o modelo de propagação de RF mais simples. Ele assume não haver obstáculos entre as antenas transmissora e recetora e que a onda de rádio se propaga numa linha reta. Este modelo é útil para cálculos rápidos e simples, mas não fornece uma representação precisa da propagação de RF em ambientes reais(Seybold, 2005).

No modelo de espaço livre, usado para deduzir a equação 1.18, o nível do sinal recebido é calculado com base na distância entre as antenas e na frequência do sinal. Este modelo é frequentemente usado como um ponto de referência para outros modelos de propagação de RF, ao fornecer o valor de atenuação que seria obtido se as antenas estivessem em espaço livre, sem obstruções pelo terreno e sem refração atmosférica(Seybold, 2005).

No entanto, o modelo de espaço livre tem as suas limitações. Ele não considera os efeitos da difração, refração, reflexão e outros fenómenos que podem ocorrer durante a propagação de RF. Além disso, ele assume que a antena recetora está diretamente na linha de visão da antena transmissora, o que nem sempre é o caso em ambientes reais(Seybold, 2005).

#### Modelo Longley-Rice

O modelo de propagação Longley-Rice, também conhecido como modelo de terreno irregular(ITM), é um modelo de propagação de RF amplamente utilizado que considera a frequência, a polarização, a altura da antena, e as características do terreno e da atmosfera. O modelo foi criado para frequências entre 20 MHz e 20

GHz<sup>3</sup> e baseado na teoria eletromagnética e em análises estatísticas que consideram as características do terreno e medições de rádio(Hufford, Longley, Kissick et al., 1982).

O objetivo principal do modelo de Longley-Rice é utilizar técnicas estatísticas para estimar como o sinal varia ao longo do espaço, considerando fatores como a altura das antenas, a irregularidade do terreno, a frequência do sinal e as variações nas condições atmosféricas. Essa abordagem estatística permite prever a atenuação mediana do sinal, fornecendo uma estimativa razoável da perda de sinal num determinado cenário de propagação(Hufford, Longley, Kissick et al., 1982).

Um dos principais parâmetros considerados no modelo de Longley-Rice é a altura das antenas transmissora e receptora. Essa altura é um fator crítico para determinar a área de cobertura do sinal e a capacidade de detecção de alvos em diferentes altitudes.

Além disso, o modelo de Longley-Rice considera as características do terreno ao longo do caminho de propagação. O terreno pode apresentar elevações, depressões e irregularidades que afetam a propagação das ondas RF. Por exemplo, obstáculos como montanhas, prédios e árvores podem causar reflexões, difrações e bloqueios do sinal, resultando em variações na intensidade do sinal recebido.

As condições atmosféricas também são consideradas no modelo de Longley-Rice. Parâmetros como a humidade, a temperatura e a refratividade do ar afetam a propagação das ondas de rádio. A variação dessas condições pode causar desvios na velocidade de propagação do sinal e na atenuação do sinal ao longo do caminho de propagação.

A frequência do sinal é outro fator importante considerado no modelo. Diferentes frequências apresentam comportamentos de propagação distintos. O modelo de Longley-Rice é projetado para lidar com uma ampla faixa de frequências e é aplicável desde frequências de rádio até micro-ondas.

Além desses parâmetros, o modelo de Longley-Rice incorpora diversos fenômenos associados à propagação de ondas RF, como reflexão, refração, difração e absorção.

---

<sup>3</sup>Fora deste intervalo de frequência, as características de propagação das ondas de rádio podem ser significativamente diferentes e as suposições feitas no modelo Longley-Rice podem não ser mais válidas(Hufford, Longley, Kissick et al., 1982).

No entanto, o modelo tem algumas limitações. Por exemplo, por ser um modelo estatístico, fornece previsões médias de perda de caminho e não pode prever com precisão a perda de caminho em qualquer local específico. Além disso, o modelo assume que o meio ambiente é homogêneo ao longo do caminho de propagação, o que nem sempre é o caso na realidade. Portanto, as previsões do modelo Longley-Rice devem ser usadas com cautela e validadas com medições sempre que possível (Hufford, Longley, Kissick et al., 1982).

Portanto, para o propósito da nossa simulação de cobertura de radar em Cabo Verde, o modelo Longley-Rice é uma boa escolha devido à sua capacidade de modelar com uma certa precisão a propagação de RF em áreas com diferentes perfis de elevação.

## **1.6 Fatores que Influenciam o Desempenho do Radar.**

O desempenho de um sistema de radar é determinado por uma série de fatores, cada um deles influenciando uma determinada característica do sistema. Nesta seção, examinaremos os principais fatores que influenciam o desempenho do radar.

A frequência de operação de um radar tem um impacto significativo em várias características do sistema, como o alcance, a resolução e a capacidade de penetração da onda de rádio. Em geral, as frequências mais altas proporcionam uma resolução melhor, mas um alcance menor, enquanto as frequências mais baixas proporcionam um maior alcance, mas uma resolução menor. Normalmente, os sistemas de radar de vigilância costeira operam em bandas de frequências X (8-12 GHz) ou S (2-4 GHz), que oferecem um bom equilíbrio entre resolução e alcance. A escolha da faixa de frequência depende do objetivo do radar e das características da área em questão e dos alvos esperados.

A potência do transmissor é outro que influencia no desempenho do radar. Sistemas de radar de longo alcance, como alguns utilizados em vigilância costeira, geralmente requerem altas potências de transmissão, variando de dezenas a centenas de quilowatts, para proporcionar um raio de cobertura adequado e superar as perdas de propagação do sinal.

O ganho da antena determina a capacidade de direcionar e a eficiência do radar. Antenas de alto ganho, como antenas parabólicas ou antenas em forma

de *phased array*, são comumente utilizadas em sistemas de radar de vigilância costeira. O ganho da antena varia conforme o tamanho e a geometria da antena, sendo escolhido conforme as necessidades de detecção.

A sensibilidade do receptor é a capacidade do radar de detectar sinais de baixa potência. A sensibilidade do receptor é influenciada por fatores como a largura de banda do sistema e a taxa de amostragem do sinal recebido. Os fenômenos associados à propagação do sinal têm um grande impacto no desempenho do radar. Por exemplo, a atenuação do sinal devido a perdas por propagação pode reduzir o alcance do radar, enquanto a refração atmosférica pode desviar o sinal do seu caminho direto, o que pode levar a erros de medição.

A altura da antena tem um impacto significativo no desempenho do radar devido ao princípio da linha de vista e à curvatura da Terra, fazendo com que quanto maior a altura da antena, maior é a área de cobertura, no entanto, a resolução diminui. Em outras palavras, um radar com antena mais alta pode detectar alvos mais distantes, mas pode ter dificuldade em distinguir entre alvos próximos uns dos outros.

As condições do ambiente, como clima, terreno e interferências, podem afetar adversamente o desempenho do radar. Como em Cabo Verde o clima é árido ou semiárido, com temperaturas moderadas e baixa umidade relativa do ar, têm um impacto geralmente favorável no desempenho dos sistemas de radar de vigilância costeira. No entanto, durante a estação chuvosa, mesmo com a baixa pluviosidade, pode afetar negativamente o alcance e a qualidade do sinal. Também o terreno montanhoso pode bloquear o sinal.

A interferência de outros sistemas eletrônicos pode aumentar o ruído do sistema e dificultar a detecção de alvos.

É importante considerar todos esses fatores ao projetar e operar sistemas de radar de vigilância costeira. A escolha adequada da faixa de frequência, potência do transmissor, sensibilidade do receptor, características da antena e técnicas de mitigação de interferência permitirá um desempenho otimizado do radar, garantindo a detecção confiável de alvos e a segurança das operações marítimas.

# Capítulo 2

## Desenvolvimento do Simulador

O objetivo deste capítulo é detalhar todo o processo efetuado para desenvolver o simulador em questão. Será abordado o processo de planeamento, a escolha da plataforma, a aquisição de dados, o *design* e as funções essenciais usadas para o funcionamento do simulador, bem como discutir a sua operação e funcionalidade. Também será discutido a implementação das equações vistas no capítulo 1.

Inicialmente foi considerado o uso do conceito do elipsoide de Fresnel para calcular a cobertura do radar. No entanto, será explicado detalhadamente por que essa abordagem não foi adotada como a solução final.

### Elipsoide de Fresnel

O elipsoide de Fresnel é uma representação geométrica usada em telecomunicações e propagação de ondas de rádio para determinar a viabilidade de comunicações sem fio entre duas antenas. Ele descreve a região elipsoidal tridimensional na qual os obstáculos podem causar atenuação significativa do sinal de rádio entre as antenas transmissora e recetora. Caso haja algum obstáculo no primeiro elipsoide, é esperado que a comunicação seja prejudicada devido a interferências ou obstruções.

### A Lógica da Abordagem

A ideia inicial era aplicar o conceito do elipsoide de Fresnel para calcular a cobertura do radar relativamente às antenas transmissoras e recetoras. Isso implicaria a criação de uma série de elipsoides de Fresnel que representariam zonas de cobertura para o radar em diferentes distâncias das antenas. A sobreposição ou intersecção desses elipsoides indicaria as áreas que o radar poderia cobrir e consequentemente as zonas de sombra. Após o cálculo da área coberta seria efetuado o cálculo da potência recebida de cada uma das coordenadas das áreas de cobertura, o que no fim resultaria numa área coberta com as respetivas potências recebidas.

## Limitações Encontradas

No entanto, esta abordagem inicial revelou algumas limitações significativas que impossibilitaram a sua implementação eficaz:

**Complexidade Computacional:** O cálculo de elipsoides de Fresnel para uma ampla gama de distâncias e ângulos envolveria uma quantidade substancial de cálculos geométricos complexos. Para cada ponto na área de cobertura desejada, seria necessário calcular a interseção de múltiplos elipsoides, resultando num alto consumo de recursos computacionais e tempo de processamento.

**Necessidade de Ciclos Encadeados:** Para calcular eficazmente a cobertura de radar numa área específica, seria necessário encadear vários ciclos de cálculos, levando a uma abordagem iterativa complexa. Isso aumentaria a complexidade do software e o tempo necessário para realizar as simulações.

**Restrições de Recursos:** Considerando a vasta área da Zona Económica Exclusiva de Cabo Verde, calcular a cobertura do radar para todas as coordenadas dentro dessa área seria impraticável devido aos recursos computacionais necessários e à duração das simulações.

## A Nova Abordagem

Após a identificação das limitações na abordagem do elipsoide de Fresnel, foi fundamental considerar alternativas que permitissem uma simulação eficaz da cobertura radar usando uma larga escala de dados. A escolha de uma abordagem que fosse computacionalmente eficiente e escalável era imperativa para atingir os objetivos do projeto.

Sendo o MatLab uma plataforma de computação técnica amplamente utilizada em engenharia, uma das suas características distintivas é a disponibilidade de um extenso conjunto de bibliotecas e ferramentas para cálculos científicos e de engenharia. No contexto deste projeto, foram exploradas as seguintes características do MatLab:

**Modelos de Propagação:** possibilidade de usar funções que calculam a propagação de ondas de rádio usando modelos de espaço livre (free space) e o modelo de Longley-Rice, modelos esses vistos no capítulo anterior.

**Cálculos Eficientes:** bibliotecas otimizadas para cálculos numéricos e possui uma linguagem de programação de alto desempenho. Isso permite realizar cálculos complexos eficientemente, abordando a complexidade computacional associada à simulação de cobertura radar numa área extensa.

**Flexibilidade:** A plataforma é flexível e permite a integração de cálculos personalizados e funções definidas pelo utilizador. Isso possibilitou a adaptação das bibliotecas existentes para atender às necessidades específicas do simulador de cobertura radar.

Assim sendo, podemos enumerar as vantagens dessa nova abordagem que consiste em usar as ferramentas disponíveis no MatLab para desenvolver o simulador:

**Eficiência Computacional:** Ao aproveitar os algoritmos dos modelos de propagação de ondas de rádio predefinidos, o simulador pôde calcular a densidade de potência de forma rápida e eficiente para uma ampla gama de pontos na área de interesse.

**Precisão e Confiabilidade:** Os modelos de propagação disponíveis no MATLAB são baseados em equações científicas estabelecidas, garantindo resultados precisos e confiáveis na simulação da cobertura radar.

**Flexibilidade de Personalização:** A plataforma MATLAB permitiu personalizar e adaptar as funcionalidades de cálculo conforme as necessidades específicas do simulador, tornando-o bastante ajustável.

Com isso, a partir desta sessão, o desenvolvimento do simulador será feito considerando a segunda abordagem, que consiste em usar as bibliotecas do MatLab para desenvolver o simulador de cobertura radar.

## 2.1 Análise dos requisitos do sistema

A definição dos requisitos de um sistema é um passo importante para a idealização do que realmente se pretende. Definir as funcionalidades de um sistema, as suas áreas de uso e as suas capacidades de entregar resultados úteis e confiáveis ajuda a tornar o processo de implementação mais fácil e conseqüentemente mais rápido.

### 2.1.1 Requisitos funcionais

O principal objetivo do simulador de cobertura do radar é fornecer uma ferramenta eficiente e precisa que preveja as áreas de detecção de um determinado sistema de radar, tanto em modo bi-estático quanto mono-estático, com base nos parâmetros do sistema fornecidos pelo utilizador. Esses parâmetros incluem a altitude das antenas, a latitude e a longitude das antenas, o ganho das antenas, a potência dos transmissores, a sensibilidade dos recetores, a frequência das antenas, as suas perdas e a secção transversal do alvo (RCS).

Uma funcionalidade adicional do simulador é a capacidade de avaliar e escolher, entre várias combinações de antenas, a que oferece a melhor cobertura.

Além disso, o simulador visa fornecer funcionalidades que aprimoram a experiência do utilizador e a utilidade da ferramenta. Isso inclui a capacidade de salvar e carregar dados de simulação, limpar dados simulados e oferecer uma calculadora de alcance detetável, potencia de pico e SNR do radar.

### 2.1.2 Utilização do Simulador

O desenvolvimento do simulador é parte de uma iniciativa voltada para o aprimoramento dos sistemas de monitorização de segurança marítima, especificamente para a Guarda Costeira de Cabo Verde. O simulador de cobertura radar foi pensado com o propósito de oferecer uma ferramenta robusta e confiável para auxiliar no planeamento de um sistema radar que supra as necessidades de cobertura na região.

Num ambiente marítimo, onde a segurança e a eficiência são de extrema importância, a previsibilidade e a fiabilidade da cobertura do radar são cruciais. O simulador de cobertura de radar fornece uma plataforma para modelar e visualizar essa cobertura, permitindo que os operadores da Guarda Costeira identifiquem quaisquer lacunas de cobertura potencial que possam exigir atenção.

Além do seu uso operacional imediato, o simulador pode ser usado como uma ferramenta educacional, proporcionando uma forma interativa e intuitiva para os profissionais de segurança marítima e estudantes aprenderem sobre os princípios e a prática da cobertura do radar. Isto, por sua vez, irá promover uma maior compreensão e habilidade na operação e análise dos sistemas de radar.

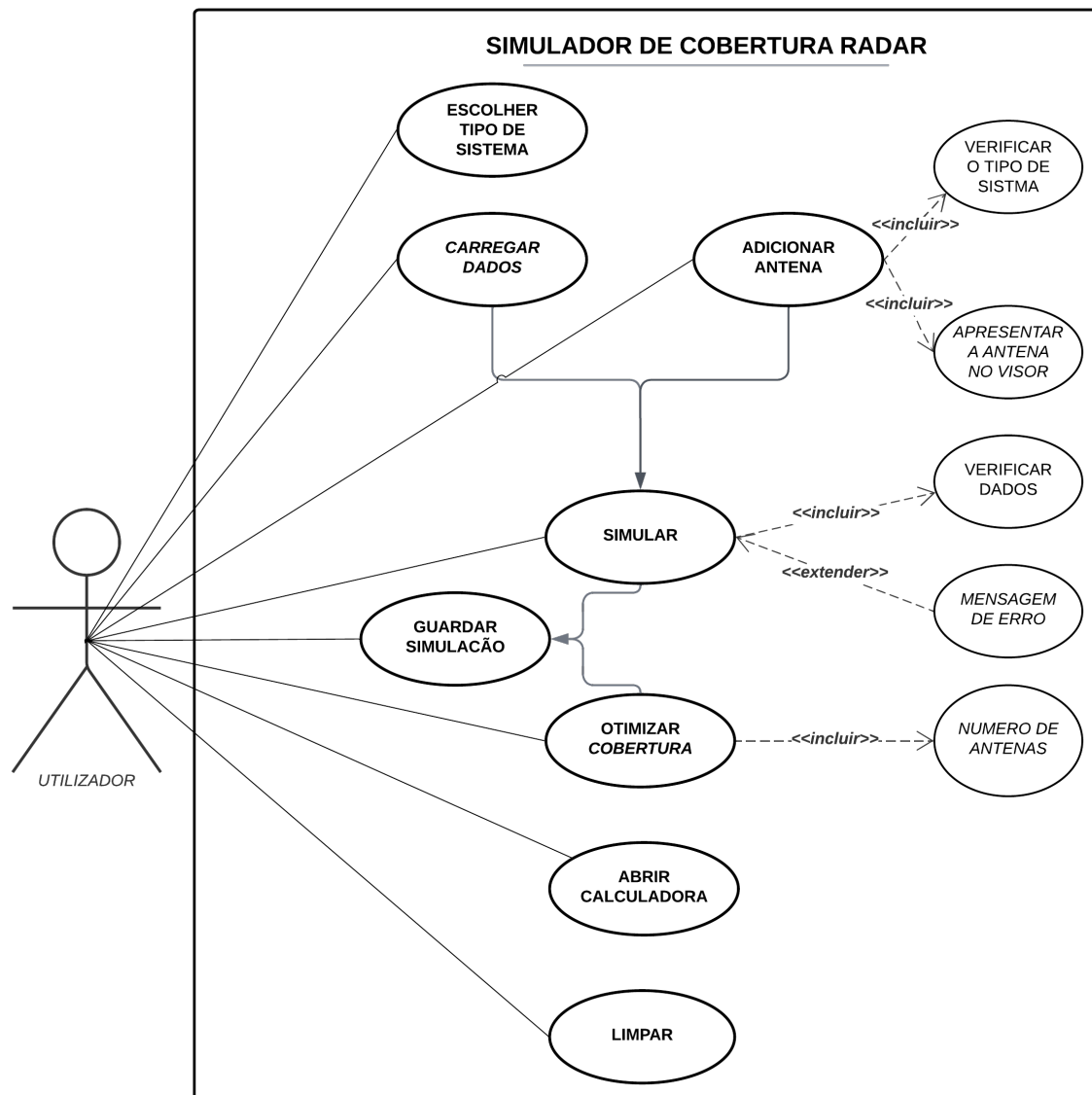


FIGURA 2.1: Diagrama UML de casos de uso: visão geral do relacionamento entre o utilizador, os casos de uso e sistemas.

Ao idealizar o simulador algumas qualidades foram tidas em conta de modo a tornar o seu uso eficiente em todos os aspetos somados. Assim sendo, apontamos algumas qualidades que consideramos essenciais para o bom funcionamento do simulador.

Primeiramente e mais importante, o simulador de cobertura radar deve conseguir entregar resultados corretos e precisos, isso é obtido com uma implementação rigorosa das teorias abordadas no capítulo 1. O simulador deve ser eficiente nas suas execuções, tendo um tempo de execução aceitável consoante os dados introduzidos. Deve ter uma *interface user-friendly* e deve ser robusto em relação a erros. A verificação dessas qualidades é realizado constantemente ao longo do desenvolvimento

do simulador.

### 2.1.3 Interface do Utilizador

O design da interface tenta acompanhar os requisitos do sistema mencionados anteriormente, ou seja, o objetivo é ter uma interface user-friendly e robusto aos erros introduzidos pelo utilizador.

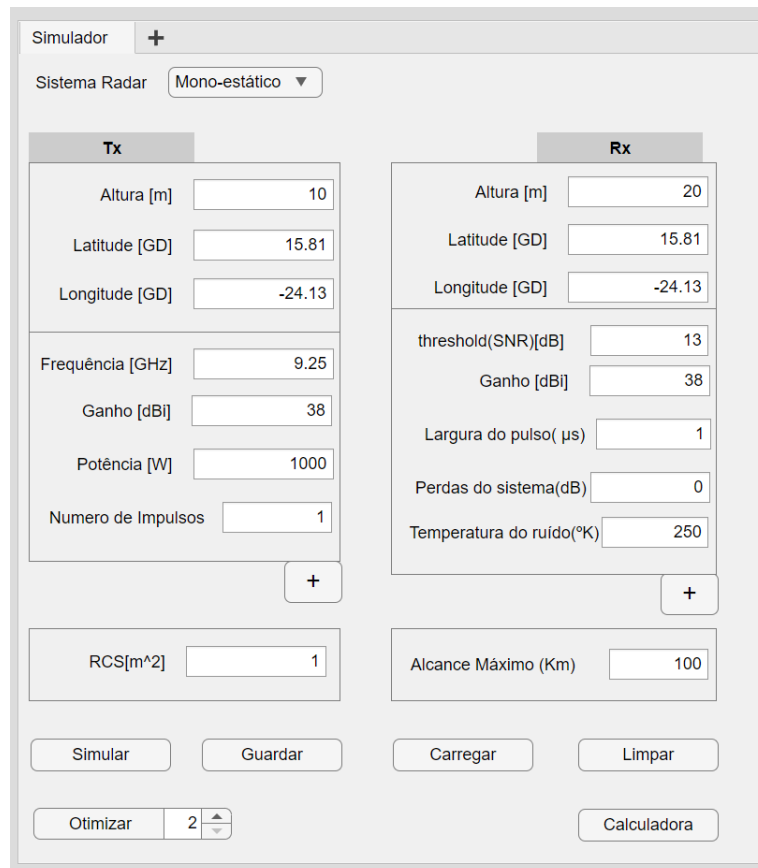


FIGURA 2.2: Interface do Simulador. Os valores apresentados são valores de controlo para não haver erro com os dados.

Os requisitos funcionais apresentados anteriormente estão presentes na interface, sendo elas:

**Sistema Radar** - permite seleccionar o tipo de sistema radar, podendo ser mono-estático ou bi-estático;

**Tx** - conjunto de campos para introduzir os parâmetros dos transmissores. Os parâmetros já são pré-estabelecidos de modo a não introduzir dados incompatíveis;

**Rx** - conjunto de campos para introduzir os parâmetros dos recetores. Os parâmetros já são pré-estabelecidos de modo a não introduzir dados incompatíveis;

**Botões +** - permitem criar as antenas com os parâmetros introduzidos em **Tx** e **Rx** e apresentá-las no **SiteViewer**;

**RCS**[ $m^2$ ] - recebe o valor do RCS dos alvos;

**Alcance Máximo(Km)** - esse campo permite controlar a resolução dos dados. Quanto maior o valor, mais amostras serão analisados, o simulador terá mais tempo a processar os dados e os resultados apresentados terão menos resolução;

**Simular** - caso as antenas já tenham sido criados, por meio do Botão **+** irá correr a simulação e apresentar os dados no **SiteViewer**, caso contrário irá apresentar o seguinte erro:

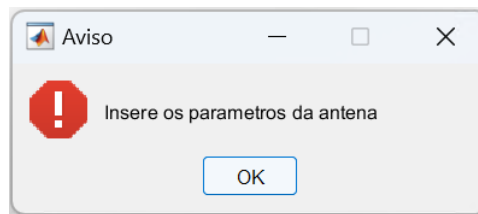


FIGURA 2.3: Mensagem de erro apresentado ao tentar correr a simulação sem criar ao menos uma antena.

**Guardar** - permite guardar alguns parâmetros do sistema radar e os dados da simulação. O objetivo é poder voltar a apresentar os resultados das simulações e rever os parâmetros usados na simulação;

**Carregar** - permite carregar as simulações guardadas;

**Otimizar** - permite, por meio de um algoritmo de otimização, escolher qual combinação de  $n$  radares irá fornecer maior cobertura. O número de antenas é escolhido pelo utilizador, esse numero não pode ser inferior a 2 e quanto maior o número de antenas mais tempo o algoritmo leva a processar;

**Limpar** - permite limpar os dados das antenas e dados de simulação de modo a iniciar uma nova simulação, essa ação implica limpar os *plots* no **SiteViewer**;

**Calculadora** - abre uma calculadora nativa do MatLab que permite calcular parâmetros de radares.

O **SiteViewer** é apresentado com a interface do simulador, ou seja, faz parte da interface. É um visualizador que permite apresentar as antenas TX e

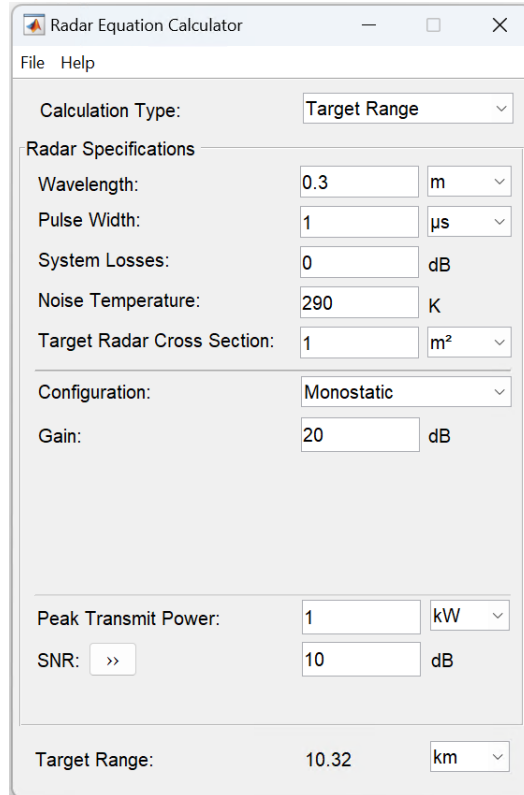


FIGURA 2.4: Aplicação Calculadora de equações de radar do MatLab.

Rx, visualizar a propagação RF e algumas informações úteis como coordenadas e elevações.

## 2.2 Escolha da Plataforma de Simulação.

O *MatLab* foi escolhido como plataforma para criar o simulador por ser um ambiente de programação de alto nível amplamente utilizado na engenharia, pela sua facilidade de trabalhar com matrizes, visualização de dados e recursos de modelagem e simulação.

O conjunto de bibliotecas como o *Radar Toolbox* e *Antenna Toolbox* e funções de simulação e de processamento de dados que permitem uma implementação eficiente do modelo teórico referente à cobertura radar foram outros motivos que levaram à escolha da plataforma. Além disso, o MatLab também oferece uma ferramenta de desenvolvimento de interface gráfica, o *App Designer*, utilizada para a criação da interface gráfica do utilizador (GUI).

Para o desenvolvimento do simulador de cobertura radar, foi necessário a utilização de vários pacotes nativos do *MatLab*, entre todos os pacotes utilizados, dois

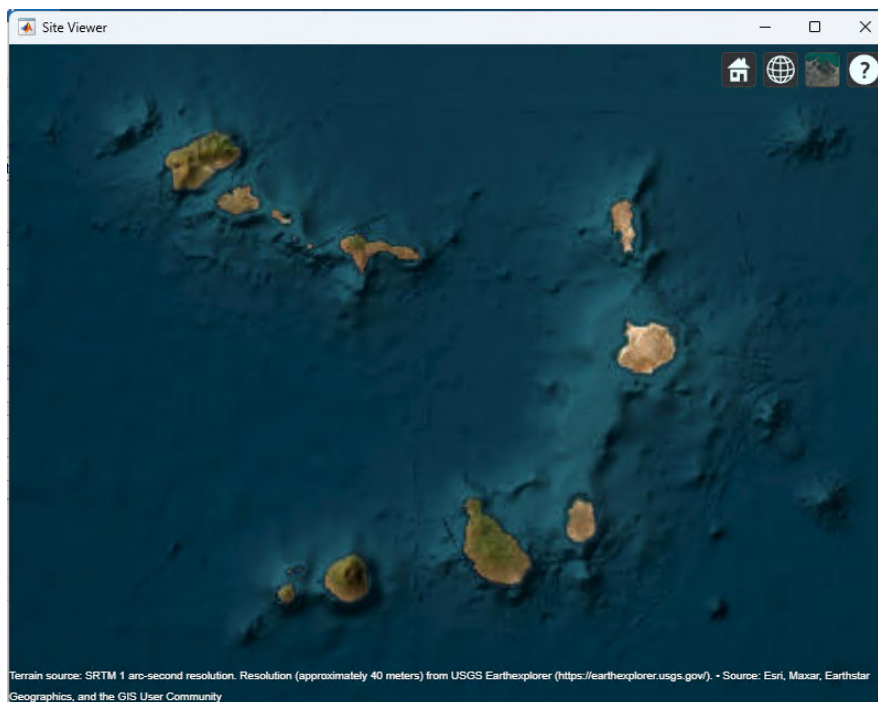


FIGURA 2.5: SiteViewer - interface de visualização de antenas e de propagação RF do MatLab.

destacaram-se, sendo eles o *Mapping Toolbox* que foi usado para análise e tratamento dos dados geoespaciais e o *Antenna Toolbox* usado nesse projeto para criar estações de antenas, adquirir os dados de cobertura, para visualizar os dados simulados e entre outros.

## 2.3 Aquisição e tratamento dos dados

Uma parte crucial do desenvolvimento do simulador foi a integração dos dados geoespaciais na simulação. Os dados geoespaciais foram obtidos através do site <https://earthexplorer.usgs.gov/> e integrados ao simulador. Eles são essenciais para uma simulação mais realista, ao permitirem que a simulação considere as características específicas da área geográfica de interesse e também permite ter uma resolução de aproximadamente 40 metros, diferente do que é padrão no *MatLab* que é de aproximadamente 250 metros.

Os arquivos são baixados no formato *.dt2*, DTE (Digital Terrain Elevation Data) de nível 2. É um formato de dados geoespaciais que representa a topografia e a elevação da superfície da Terra. O DTED de nível 2 fornece uma representação digital de alta resolução da elevação do terreno, dividindo a superfície da Terra em pequenas células e atribuindo valores de elevação a cada célula (Dod, 2000).

Cada arquivo DTED Level 2 contém 3.601 pontos de latitude e 3601 pontos de longitude, resultando num total de 12962401 pontos de elevação para cada célula usada no projeto. Foram usadas 16 células de elevações e coordenadas nesse projeto.

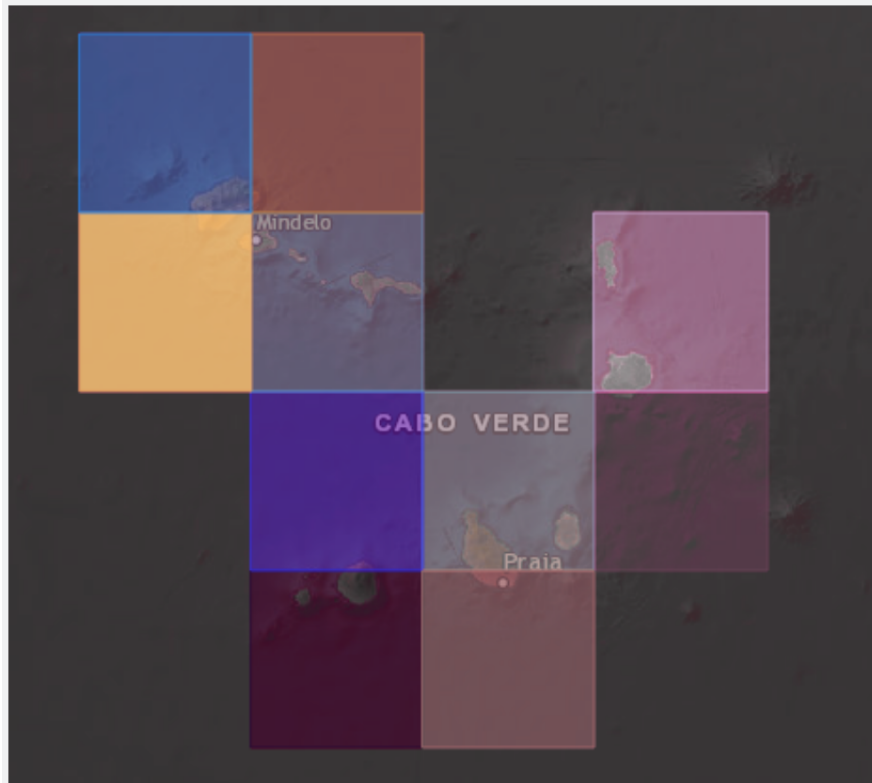


FIGURA 2.6: Áreas selecionadas no site EarthExplorer

No site da *earthexplorer.usgs.gov*, são disponibilizados apenas dados que possuem áreas com porções de terra, na figura 2.6 correspondem às áreas delimitadas pelos quadrados coloridos. As outras áreas correspondem ao mar e por não possuírem dados, foram criadas matrizes com elevações iguais a zero e com as respectivas coordenadas e concatenadas com os restantes dados de modo a haver uma única matriz de elevações. Com isso foram usadas 10 ficheiros DTED e 6 matrizes criadas para completar a área de interesse totalizando 16 células de elevações e coordenadas.

Também havia algumas áreas nos quais os valores de elevação não estavam disponíveis, o que para o cálculo das distâncias iria originar erros. Para resolver esse problema foi aplicada uma interpolação de modo a ter dados mais próximos da realidade.

Os dados geoespaciais foram usados no cálculo das distâncias, considerando as elevações e o raio da terra, também foram usados para tornarem as simulações

das coberturas mais fiáveis, já que essas simulações consideram os obstáculos, o que significa que quanto menor a distância entre os pontos mais obstáculos serão reconhecidos e considerados para o cálculo das perdas.

Embora os dados abrangem vários pontos e com uma boa resolução, a área total de cobertura é de apenas 195.926 km<sup>2</sup>, o que representa apenas 26,6% da extensão total da Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Cabo Verde. Isso acaba por limitar a abrangência do simulador em relação à área.

Os códigos usados para manipular os dados encontram-se no apêndice.

## 2.4 Implementação

Nesta secção, serão apresentados os códigos que simulam os comportamentos dos diferentes aspetos de um sistema de radares abordados no capítulo anterior.

O simulador será dividido em diferentes módulos, com isso facilitará o processo de implementação, identificação de erros e futuramente a melhoria dos códigos.

### 2.4.1 Divisão dos módulos

Os códigos do simulador estão estruturados em módulos, sendo cada um dedicado a uma funcionalidade específica. Para cada tipo de sistema radar, como o mono-estático e o bi-estático, existe um módulo correspondente responsável pelo cálculo da cobertura, nomeadamente *monostatic.m* e *bistatic.m*, além disso, foi necessário criar um módulo para calcular as distâncias entre os alvos e os recetores no sistema bi-estático, sendo este o módulo: *distance\_dsxr.m*.

Um módulo adicional, *melhorRadarSites.m*, foi desenvolvido para otimizar a seleção dos locais de radar que maximizam a cobertura. E, por fim, a interface gráfica do simulador foi criada por meio do módulo *SimuladorCobertura2.mlapp*. Essa estrutura modular permite a gestão eficiente das funcionalidades do simulador, tornando cada etapa compreensível e facilmente manipulável.

O diagrama a seguir ilustra como esses módulos interagem entre si.

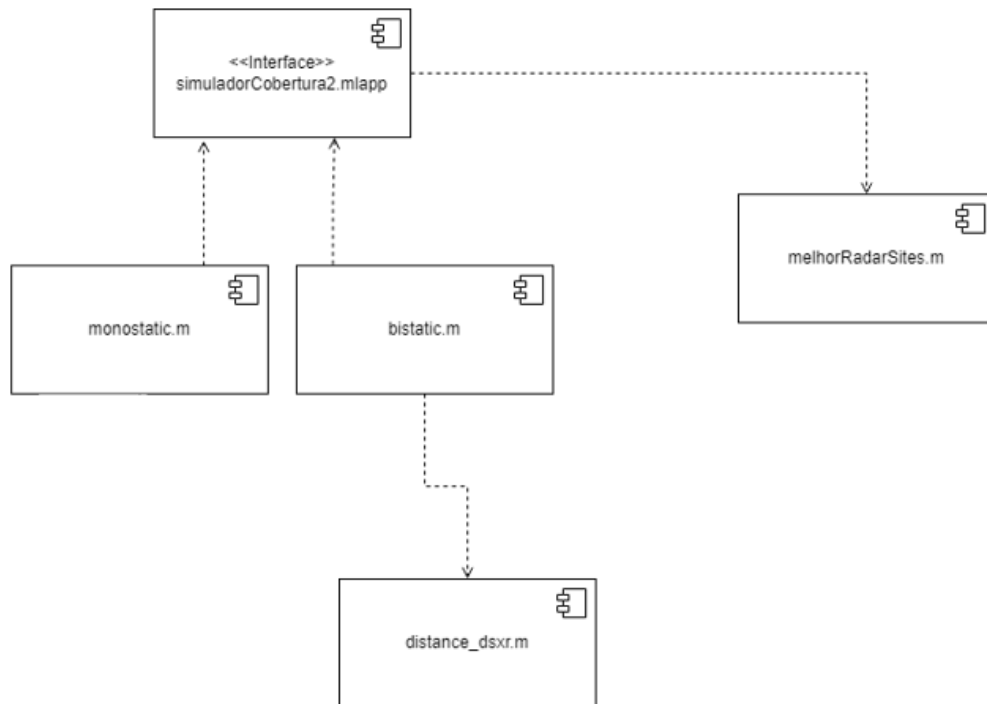


FIGURA 2.7: Diagrama de módulos: Interação entre os módulos do simulador.

A seguir será apresentado os detalhes da implementação de cada módulo.

### *monostatic.m*

A função *monostatic* é responsável pela simulação da cobertura de sistemas radar mono-estáticos.

---

```

1 [Den_potenc, potenMax, sensibilidade, pdata] =
  monostatic (rdrtxs, rrrxs, antgainlin, tgtrcs,
  sensibilidade1)
  
```

---

CÓDIGO FONTE 2.1: Função monostatic

Esta função recebe vários argumentos que definem o cenário de simulação, sendo esses:

*rdrtxs*: parâmetros das antenas introduzidos pelo utilizador nos campos  $Tx$ ;

*rrrxs*: parâmetros das antenas introduzidos pelo utilizador nos campos  $Rx$ ;

*antgainlin*: vetor com os valores dos ganhos das antenas.

**tgtrcs**: valor da secção transversal do radar (RCS) dos alvos.

**sensibilidade1**: vetor com os valores de SNR de limiar de detecção.

O cálculo da densidade de potência é feita por meio da função *coverage*. Essa função é nativa do MatLab e calcula a densidade da potência em vários pontos de uma área geográfica delimitada pelo valor do argumento *MaxRange* que recebe o valor introduzido pelo utilizador no campo *Alcance Máximo(Km)*. A função recebe também os argumentos *PropagationModel* que é o modelo de propagação de RF usado para calcular a densidade de potência e *txsite* que são os parâmetros das antenas. Para valores de frequência abaixo de 20 MHz o simulador usará o modelo de espaço livre e para valores acima de 20 MHz será usado o modelo de Longley-Rice.

Nesse caso, por se tratar de um sistema mono-estático é considerado que o valor das perdas é igual em ambos os sentidos do percurso.

Os valores da densidade são aplicados no trecho do código que calcula a potência recebida pelo recetor e guarda os valores na variável *potenRx*;

Após o cálculo da potência no recetor são selecionados os valores da potência maiores ou iguais ao SNR de limiar de detecção e guardados na variável *Power*, são simultaneamente criadas as variáveis *Latitude* e *Longitude* que indicam as coordenadas dos alvos. A variável *Denpotenc* é criada com a função *propagationData* que guarda os dados da propagação, nomeadamente a potência e as localizações. No final a função *monostatic* retorna as variáveis *Denpotenc*, *potenMax*, *sensibilidade* e *pdata*, que serão guardados para análises futuras.

### ***bistatic.m***

A função *bistatic* é responsável pela simulação da cobertura de um sistema de radar bi-estático. Num sistema de radar bi-estático, o transmissor e o recetor posicionadas em diferentes localizações.

---

```
1 [Den_potenc ,potenMax , sensibilidade ,pdata] = bistatic
   (rdrtxs , rdrxs , antgainlin , antgainlntx , tgtrcs ,
   sensibilidade)
```

---

CÓDIGO FONTE 2.2: Função *bistatic*

Esta função recebe os mesmos parâmetros que a função *monostatic.m*, diferenciando apenas no fato de que o ganho pode diferir entre as antenas Tx e Rx, recebendo o argumento *antgainlntx* que são os valores dos ganhos das antenas Rx.

Nesse caso, o valor das perdas no percurso transmissor-alvo não podem ser consideradas iguais aos valores de perdas que ocorrem no percurso alvo-recetor. Para esse caso, no percurso transmissor-alvo foi usado o modelo de Longley-Rice e no percurso alvo-recetor foi usado o modelo de espaço livre, isso para poupar os recursos computacionais.

### *distance\_dsxr.m*

Esse módulo é chamado pela função *bistatic* e calcula a distância entre cada posição dos alvos em relação recetor dos alvos. As posições são determinadas pela função *coverage* e guardadas na variável *pdada*.

---

```
1 d = distance_ds (rdrlatsm, rdrlonsm, tgtkons, tgtkats,
    elevacao, latitus, longitus)
```

---

CÓDIGO FONTE 2.3: Função distance

Os argumentos de entrada de ambas as funções são:

- rdrlatsm***: vetores com os valores de latitudes das antenas recetoras;
- rdrlonsm***: vetores com os valores de longitudes das antenas recetoras;
- tgtkons***: vetores com os valores de longitudes dos alvos;
- tgtkats***: vetores com os valores de latitudes dos alvos;
- elevacao***: matriz com os valores das elevações
- latitus***: vetor com os valores da latitudes
- longitus***: vetor com os valores das longitudes

Ambas as funções *distance\_ds* e *distance\_dsxr* são implementações da fórmula de *Haversine*:

$$d = 2r \arcsin\left[\sqrt{\sin^2\left(\frac{Lat_2 - Lat_1}{2}\right) + \cos(Lat_1) \cos(Lat_2) \left(\frac{Lon_2 - Lon_1}{2}\right)^2}\right] \quad (2.1)$$

Em que  $Lat_1$  e  $Lat_2$  são valores das latitudes em radiano,  $Lon_1$  e  $Lon_2$  são valores das longitudes em radiano e  $r$  é o valor do raio da terra.

No final devolve a variável  $d$  que contem o vetor com os valores das distâncias entre os alvos e as antenas recetoras.

### *melhorRadarSites.m*

Esta função é usada para determinar a combinação de  $n$  antenas que maximiza a cobertura do radar. Para fazer isso, o algoritmo avalia todas as combinações de  $n$  antenas e escolhe a combinação que fornece a maior cobertura de radar.

---

```
1 [bestind, Den_potenc] = melhorRadarSites(potenMax ,  
    sensibilidade ,pdata ,tipoSis)
```

---

CÓDIGO FONTE 2.4: Função *melhorRadarSites*

A função *melhorRadarSites* recebe como entrada as seguintes variáveis:

***potenMax***: matriz de células com os valores de SNR da simulação;

***sensibilidade***: vetor com os valores de SNR de limiar de detecção;

***pdata***: matriz com os dados da cobertura e coordenadas dos alvos;

***tipoSis***: variável do tipo *string* que especifica o tipo de sistema radar a ser tratado.

O algoritmo cria todas as combinações de  $n$  antenas possíveis e então escolhe a combinação com a maior cobertura, nesse caso o maior número de detecções.

São criadas as variáveis *Power*, *Latitude* *Longitude* e então criado, com a função *propagationData*, a variável *Den\_potenc* para criar que armazena os dados da cobertura. No final da execução a função retorna as variáveis *Den\_potenc* e *bestind*.

### *simuladorCobertura2.mlapp*

O modulo *simuladorCobertura2.mlapp* contem as restantes funções que fazem parte do simulador e são essas as funções que permitem a interação do utilizador com o aplicativo, ou seja, é a implementação da interface gráfica do simulador.

As principais funções são as implementações dos requisitos funcionais do simulador, sendo eles:

***AddTxPushed***: função que recebe os atributos das antenas de transmissão após ser premido o respetivo botão;

***AddRxPushed***: função que recebe os atributos das antenas de receção após ser premido o respetivo botão;

***SimularButtonPushed***: função que chama, conforme o tipo de sistema, as funções *monostatic* ou *bistatic* e apresenta o resultado no *SiteViewer*;

***GuardarButtonPushed***: função que permite guardar, após a simulação, os dados das simulações, assim como os dados das antenas;

***CarregarButtonPushed***: função que permite o utilizador carregar os valores

guardados e apresentá-los ou aplicar a otimização caso necessário;

**OtimizarButtonPushed:** essa função chama a função *melhorRadarSites* que permite otimizar a cobertura;

**LimparButtonPushed:** função que permite apagar os dados a serem apresentados no *SiteViewer* e em outras variáveis que não estejam em uso.

O código completo de cada função estão detalhadas no apêndice A.

## 2.5 Testes do Simulador

O teste de software é um processo relacionado ao desenvolvimento que tem como principal objetivo revelar falhas por meio da análise dinâmica de programas(Souza, 2018). Os testes permitem verificar se os requisitos do sistema, abordado no subcapítulo 2.1, estão presentes no software final.

Esses testes consistem em identificar possíveis erros e limitações do sistema relacionados com diferentes casos de uso que podem prejudicar a experiência do utilizador, assim como conhecer o comportamento do simulador em diferentes casos.

### 2.5.1 Testes de casos de uso

Os testes consistem em usar o simulador considerando todos os casos de uso possíveis.

O objetivo é simular diferentes configurações de sistemas de radar, guardar os dados simulados e voltar a carregar esses dados. Foi considerado situações em que o utilizador introduziu dados corretamente e casos em que o utilizador introduziu dados errados.

Com os testes realizados foi possível identificar alguns erros e algumas limitações, sendo eles:

**Erros:** A guardar e/ou carregar dados o visualizador de dados, *SiteViewer* fecha e volta a abrir com os dados apagados, esse erro é conhecido e propositada, já que a intenção é impedir que o visualizador fique bloqueado após usar a função auxiliar *wiputfile()* presente nas funções *GuardarButtonPushed()* e *CarregarButtonPushed()*.

**Limitações:** De modo a manter a fluidez e robustez do simulador, existe a necessidade de estar constantemente a apagar os dados guardados nas variáveis e no

visualizador, essas limpezas acontecem diversas vezes durante o uso do simulador. Com isso, sempre que o utilizador queira realizar tarefas como mudar o tipo de sistema radar, guardar ou carregar dados, automaticamente ocorrem essas limpezas.

Outra limitação é a incapacidade de selecionar e eliminar antenas caso o utilizador introduza dados errados, quando isso acontece a única opção é usar a função limpar e reiniciar todo o processo. Por fim, a forma mais rápida do utilizador introduzir as coordenadas das antenas é por meio dos atalhos CTRL+C e CTRL+V, pois o *SiteViewer* não permite automatizar esse processo.

A maioria desses erros e limitações podem ser resolvidos, já que tem a ver principalmente com a lógica usada na implementação. A existência desses erros e limitações não interrompem o uso do simulador com erros.

### 2.5.2 Testes de desempenho

O teste de desempenho permite verificar como a gestão relativamente ao tempo de processamento e recursos utilizados pelo simulador em diferentes cenários, cenários esses determinados pelos dados introduzidos.

O número de antenas tem implicações no desempenho, levando mais tempo a processar, o que é normal considerando o aumento de dados a serem processados. Outro fator que contribui para um maior consumo de recursos computacionais são as frequências das antenas, que quanto menor a frequência maior será o alcance e consequentemente haverá mais cálculos a serem realizados, assim como mais memória a ser alocada, o aumento da potência e a diminuição da sensibilidade também contribui para um maior consumo dos recursos computacionais. Uma solução para isso é o uso coreto da funcionalidade *Alcance Máxima* que permite ter um certo controlo sobre a quantidade de amostras.

Apesar de cumprir com o objetivo principal que é a de simular a cobertura de um sistema de radares, o simulador conta com alguns *bugs* que o afasta um pouco do projeto idealizado. As técnicas usadas para minimizar os erros do simulador tornaram o uso do mesmo menos intuitivo e por vezes pouco prático.

As falhas que ocorrem ao usar o simulador podem ser resolvidas com futuras alterações no código.



# Capítulo 3

## Simulação de Cenários e Análise de Resultados

Neste capítulo, serão apresentadas simulações visando avaliar a viabilidade do uso do simulador no auxílio do planejamento de sistemas de radares de vigilância costeira em Cabo Verde. O objetivo é analisar como são apresentadas as áreas de cobertura e se essas áreas vão de encontro com os fundamentos teóricos discutidos no Capítulo 1.

### 3.1 Características dos Sistemas Radares Simulados

Para realizar as simulações dos cenários de vigilância costeira em Cabo Verde, foram utilizados dados de radares de vigilância costeira de banda X. Esses radares são projetados especificamente para monitorizar e controlar o tráfego de navios nas áreas costeiras, proporcionando um amplo alcance e uma cobertura detalhada das áreas marítimas próximas.

É importante destacar que a obtenção de informações detalhadas e precisas sobre os parâmetros dos radares pode ser uma tarefa desafiadora, isto porque, os fabricantes costumam fornecer informações limitadas dos parâmetros dos seus produtos.

As informações utilizadas nas simulações foram baseadas nos modelos GEMINI-DB SSR e Sentinel-800 ambas da companhia GEM elettronica. Alguns parâmetros não estão disponíveis, portanto, são calculados com base nas informações disponíveis, outros parâmetros foram escolhidas a partir de outros de modelos similares.

ANTENNAS AND ROTATING UNIT

Antenna type	X		K <sub>a</sub>	
Length	9 feet		8 feet	
Polarization	horizontal		circular	
Horizontal beamwidth to -3dB	≤ 0.9°		≤ 0.26°	
Vertical beamwidth to -3dB	< 25°		< 7.5°	
Sidelobes within 10°	less than - 26 dB			
Sidelobes outside 10°	less than - 30 dB			
Gain	31 dBi ± 0.5 dB		40 dBi ± 0.5 dB	
Rotation speed	22/11 rpm (depending on range selected)			
Tolerable relative wind speed	100 knots (operative) - 120 Knots (non operative)			

TRANSMITTERS

	X		K <sub>a</sub>	
Peak power (nominal)	50, 100, 200, 400 W (Fully Solid State)		40 W (Fully Solid State)	
Frequency	between 9,300 and 9,500 MHz		between 33,600 and 34,100 MHz	
Pulse widths and PRFs:	from 0.05 to 93 µs; from 350 to 2500 Hz		from 0.05 to 12 µs; 3500 Hz	
Sector blanking	available			

RECEIVERS

	X		K <sub>a</sub>	
Type	Coherent with pulse compression processing			
I.F. bandwidth	up to 30 MHz			
Dynamic range (nominal)	> 120 dB (> 130 dB with optional RF STC)		> 100 dB	

DISPLAY UNIT

Presentation	MMI and symbols and colours as per IMO/IHO recommendations, 23" colour LCD													
Range scale (n. miles)	0.0625	0.125	0.25	0.5	0.75	1.5	3	6	12	24	48	72	96	
Ring spacing (n. miles)	0.0312	0.0625	0.125	0.125	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	12	16	
Rings	2	2	2	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Range discrimination	better than 20 m on 10 m <sup>2</sup> target with short pulse													
Azimuth discrimination	better than 1.0° (X-band), better than 0.4° (K <sub>a</sub> -band)													

INTERFACES

Input signals

- GEM's Fiber Optic Gyrocompass (FOG) series or equivalent laser-based gyrocompass: digital, standard NMEA0183;
- Positioning Systems: Digital, standard NMEA0183 for radio navigation and satellite systems (NAVSTAR GPS / OMEGA TRANSIT / LORAN C etc.);
- Log: Digital, standard NMEA0183;
- AIS: Digital, standard NMEA0183;
- TLC (reserved to future use): Digital, standard NMEA0183.

Output signals

- Bidirectional RS422 serial lines (one of them can be set as RS232, configurable) to provide target data;
- RS-343 standard RGB signal for repeater monitor;
- Digital outputs, open collector;
- Ethernet LAN 100 MB, for radar video distribution.

POWER REQUIREMENTS

Input Voltage	115 Vac, 50 ÷ 60 Hz, 1 Φ (220 Vac accepted on request)
Power absorption	≤ 1500 W

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE

As per IEC 60945 standard:

Temperature	internal units	from - 15°C to + 55°C
	external units	from - 25°C to + 55°C
	storage	from - 30°C to + 70°C
Humidity	93% at 40°C non-condensing (up to 100% at + 40°C with de-hydrator)	
Vibrations	sweep 2 Hz ÷ 13.2 Hz at ± 1 mm / 13.2 Hz ÷ 100 Hz at 7 m/s <sup>2</sup> and for 2 h on each resonance, otherwise 2 h at 30 Hz in all three axes	
Shock	6 drops from 1 m	
Enclosure	IP65 waterproof	

FIGURA 3.1: Caraterísticas do radar GEMINI-DB SSR. Fonte: [https://www.gemrad.com/wp-content/uploads/2023/05/GEMINI\\_DB\\_SSR.pdf](https://www.gemrad.com/wp-content/uploads/2023/05/GEMINI_DB_SSR.pdf)

### 3.1. Caraterísticas dos Sistemas Radares Simulados

**Sentinel series**

**TECHNICAL SPECIFICATION**



**ANTENNA UNIT**

Length:	12'	19'	21'
Type:	slotted waveguide array		
Frequency:	9250 ÷ 9500 MHz		
Polarization:	horizontal or circular		
Rotation speed:	5 / 11 / 16 RPM, depending on transmission mode selected		
Tolerable relative wind speed:	100 knots (operative) - 120 knots (non operative)		
Gain:	32.5 dB typical	35 dB typical	38 dB typical
H-BW:	0.65° typical	0.42° typical	0.35° typical
V-BW:	22° typical	18° typical	11° typical

**TECHNICAL SOLUTIONS**

- Fully coherent, fully solid state pulse compression radar
- Fully digital configuration available through software-defined functionalities
- Time and frequency diversity techniques with automatic adaptation to the real scenario
- Operator-selectable transmitted power level for each transmitting sector, up to 10 sectors programmable by the user

**MAIN FEATURES**

Instrumented range	Up to 96 NM, depending on the chosen mode
Minimum detection range	40 m from the antenna location
Target separation	Better than 15 m (short range) or 40 m (long range)
BITE	Fully integrated BITE facility covering also RF section
Interface format	TCP/IP over dual redundant 1 Gb Ethernet LAN (digital video and controls)
Interface protocol	Proprietary format
	Option: (ASTERIX Cat. 240 video, Cat. 048 plots and tracks, Cat. 253 data, states and commands)
Management	Remote during operation; local for configuration or maintenance

**FREQUENCY BAND:** 9.3 to 9.5 GHz

**MAIN FEATURES OF THE TRANSMITTER**

True transmitted power	From 200 W to 800 W
Modulation	Pulsed FM
Transmission mode	selectable among 6 according to the operating requirement
Stagger function	Available

**MAIN FEATURES OF THE RECEIVER**

Demodulation	Fully coherent
LNFE noise figure	< 2.5 dB
Receiver sensitivity	-127dBm (dynamic range up to 140 dB)
Receiver IF bandwidth	30 MHz @ - 3 dB (typical)
Compression gain	Up to 30 dB
STC	Programmable

**MAIN FEATURES OF THE TRACKER MODULE**

Embedded plot extractor	Included
Number of surface tracks	1000 or more
Speed of tracked object	Up to 100 knots
Turn rate of tracked object	Up to 20°/s
Tentative track confirmation time	≤ 1 minute
Range accuracy	Better than 0.5% of the selected range or 15 meters, whichever the greater
Azimuth accuracy	Better than 0.25°
Clutter maps	Automatic clutter map building for automatic filtering thresholds to maximize true tracks and reducing probability of fake tracks
Applicable standard	IALA Guideline 1111, 2015 - Advanced level

**EMI**

The equipment has been designed and manufactured to operate in full compliance with the international IEC 60945 standard (ed. 4, 2002-8), chapters 9 (Electromagnetic emission) and 10 (Immunity to electromagnetic environment).

**ENVIRONMENTAL CONDITIONS**

The equipment has been designed and manufactured to operate in the environmental conditions specified by the international IEC 60945 standard (ed. 4, 2002-8) chapter 8 (Durability and resistance to environmental conditions) as follows:

- Temperature range:
  - o Internal units: from -15°C to +55°C;
  - o External units: from -25°C to +55°C;
  - o Storage: from -30°C to +70°C;
  - o Note: inclusion of optional heating unit lowers range to -40°C;
- Humidity: 95% at 40°C non-condensing (up to 100% at +40°C with de-hydrator);
- Vibrations:
  - o Sweep 2 Hz – 13.2 Hz at ± 1 mm,
  - o 13.2 Hz – 100 Hz at 7 m/s<sup>2</sup> and for 2 h on each resonance, otherwise 2 h at 30 Hz in all three axes;
- Shock: 6 drops from 1 m.

**FIGURA 3.2:** Caraterísticas do radar SENTINEL. Fonte: <https://www.gemrad.com/wp-content/uploads/2023/05/Sentinel.pdf>

## 3.2 Cenários

### 3.2.1 Cenário 1: Cobertura da Rota Porto Grande-Porto Novo.

Neste cenário, o objetivo é planejar um sistema radar simples que possa fornecer uma boa cobertura da área de modo a permitir o controlo do tráfego marítimo na rota Porto Grande-Porto Novo, portos esses que pertencem às ilhas de São Vicente e Santo Antão respetivamente.

Para esse cenário foram realizadas três simulações, cada um com uma configuração diferente do sistema radar, o primeiro sistema é composto por um único radar situado no Porto Grande em Mindelo, o segundo sistema possui dois radares, uma no Porto Novo e uma no Porto Grande e o terceiro sistema é um sistema bi-estático com a antena transmissora no Porto Novo e com a antena recetora no Porto Grande.

Os parâmetros dos radares desse cenário foram baseados no modelo GEMINI-DB SSR e estão representados na TABELA 3.1. Para esse cenário foi escolhido um RCS de  $1 \text{ m}^2$ , o que representa pequenas embarcações normalmente presentes em áreas perto da costa.

Parâmetros do Radar	Valores Tx	Valores Rx
Frequência	9.3 GHz	N/A
Ganho das antenas	28.85dB (31dBi)	
Potência Transmitida	400W	N/A
SNR de Limiar de deteção (threshold)	N/A	13 dB
Número de impulsos	34	N/A
Largura do pulso	95 $\mu\text{s}$	N/A
Perdas do sistema eletrónico	12 dB	
Temperatura do ruído	258K	
Secção Transversal Eficaz (RCS)	$1 \text{ m}^2$	

TABELA 3.1: Cenário 1 - Parâmetros dos radares. “N/A” significa que determinado parâmetro não pertence a tal componente e os valores em células unidas são os parâmetros pertencente sistema.

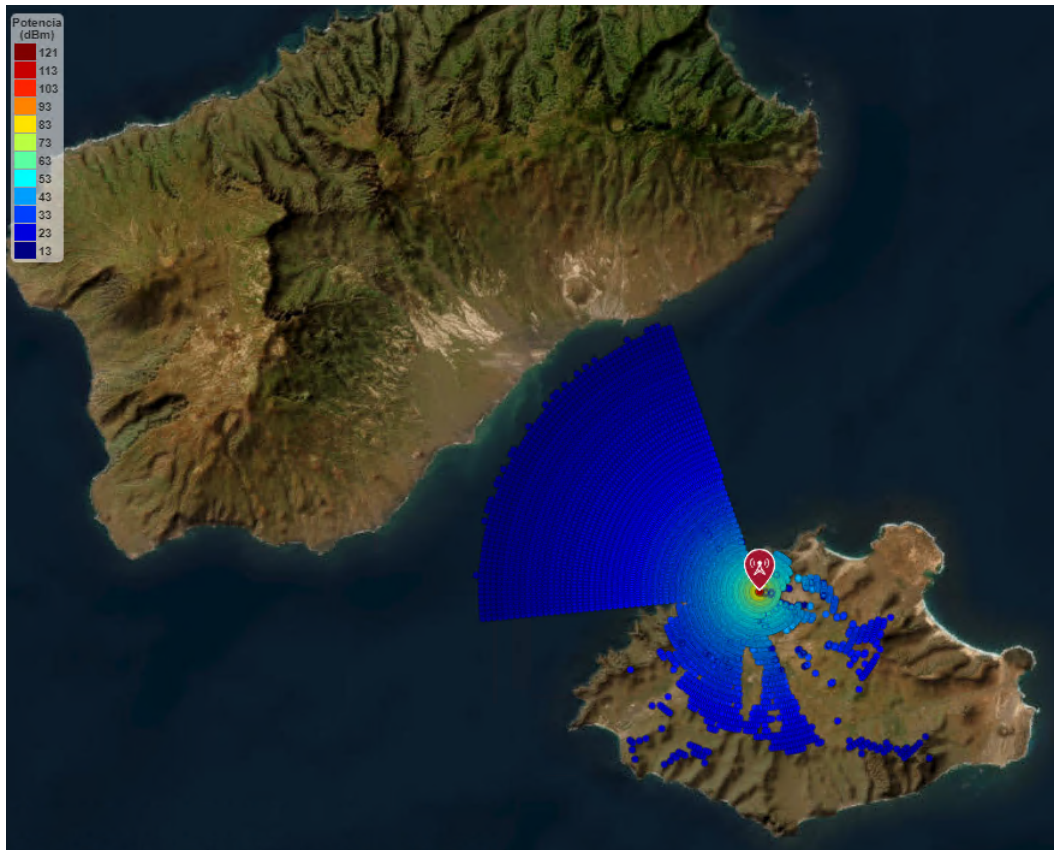


FIGURA 3.3: Cenário 1 - Simulação 1: Configuração de um sistema com um único radar

Na primeira configuração, com um único radar no Porto Grande, observamos que a cobertura da rota entre os portos foi limitada. A área não coberta pelo radar resultou em zonas de sombra, onde as embarcações poderiam passar despercebidos. Embora essa configuração seja mais económica em termos de custos de implementação e manutenção, a cobertura insuficiente limita a sua eficácia na vigilância e no controlo do tráfego marítimo nessa rota.

Parâmetros do Radar	Latitude	Longitude	$H_{Tx}[m]$	$R[m]$
Porto Grande (S.Vicente)	16.890788	-24.993058	55	14 727

TABELA 3.2: Cenário 1 - Resultado Simulação 1 -  $H_{Tx}$  é a altura das antenas acima do nível do mar e  $R$  é o raio de cobertura obtido na simulação.

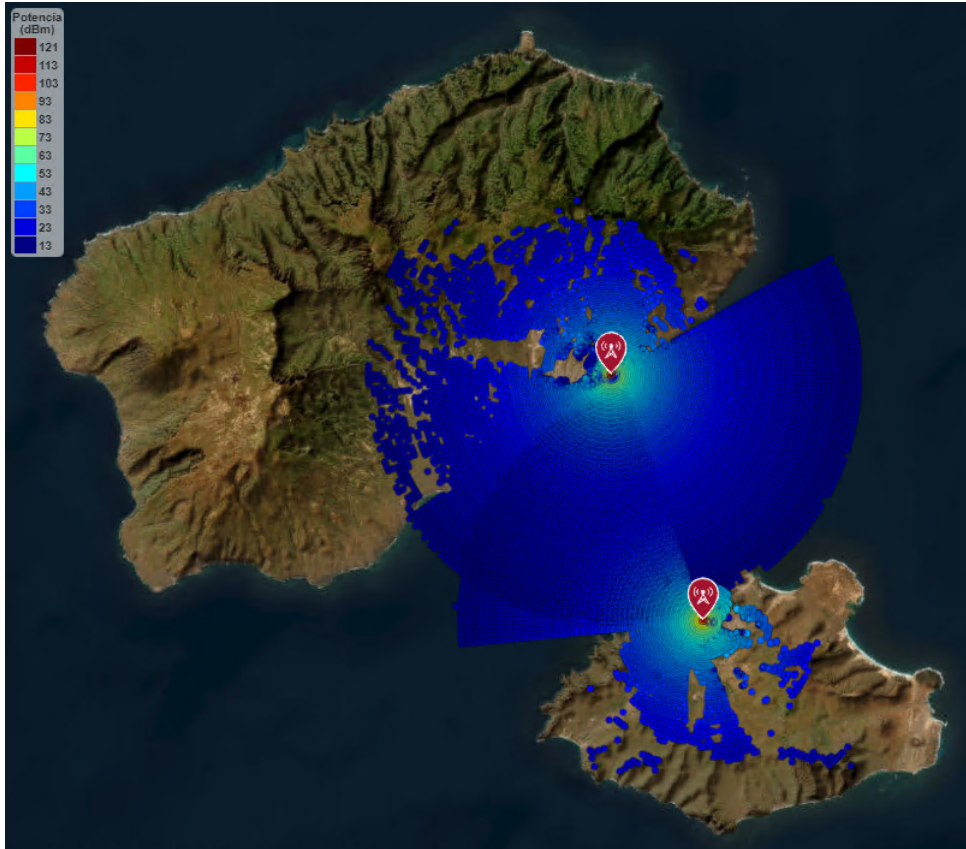


FIGURA 3.4: Cenário 1 - Simulação 2: Configuração de um sistema com dois radares

A configuração com radares nos portos de Porto Grande e Porto Novo proporcionou uma maior cobertura relativamente à configuração anterior. Com ambos os radares em operação, a zona com cobertura foi aumentada e diminuiu as zonas de sombra, permitindo assim um melhor controlo do tráfego marítimo. Essa configuração proporciona algumas vantagens como a redundância em caso de falha de um dos radares e flexibilidade na configuração independente dos radares. Em contrapartida, essa configuração pode apresentar algumas desvantagens, como um custo mais elevado e a possível interferência entre os radares.

Parâmetros do Radar	Latitude	Longitude	$H_{Tx}[m]$	$R[m]$
Porto Grande (S.Vicente)	16.890788	-24.993058	55	14 727
Porto Novo (Santo Antão)	17.022153	-25.044417	45	14 691

TABELA 3.3: Cenário 1 - Resultado Simulação 2 -  $H_{Tx}$  é a altura das antenas acima do nível do mar e  $R$  é o raio de cobertura obtido na simulação.

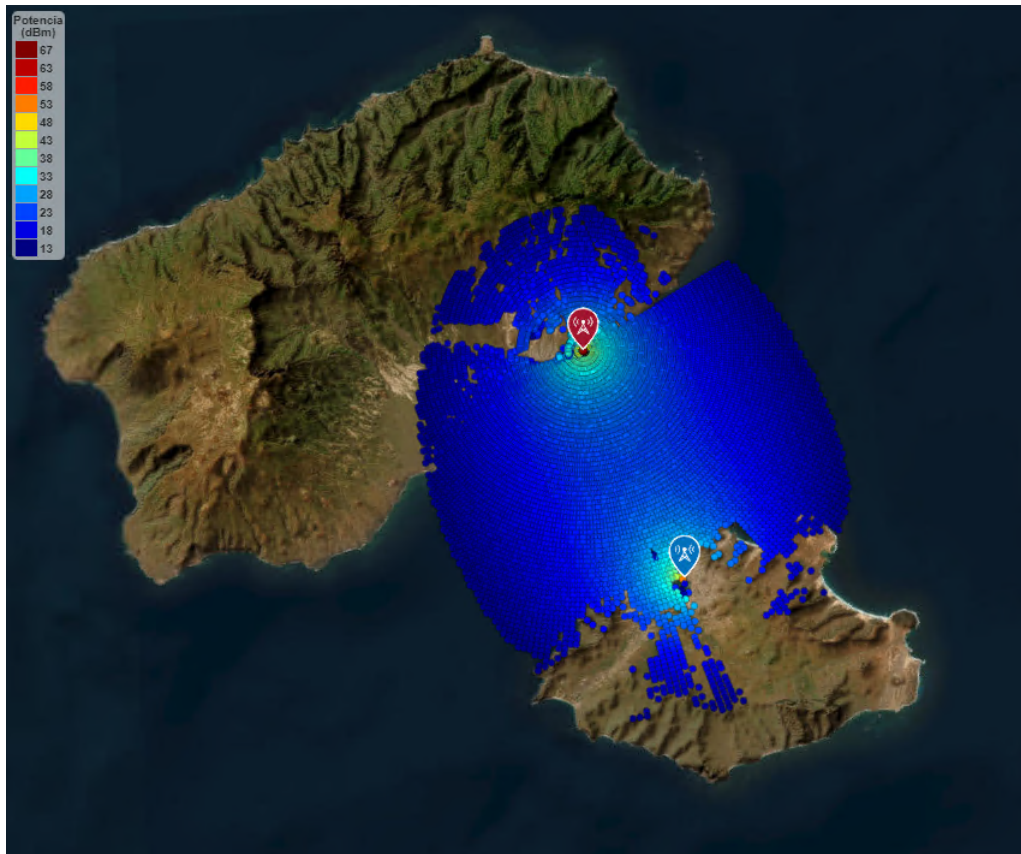


FIGURA 3.5: Cenário 1 - Simulação 1: Configuração de um sistema bi-estático

A configuração bi-estática apesar de eliminar algumas áreas de sombras presentes na segunda simulação, não conseguiu obter a maior cobertura da rota entre as ilhas, entretanto, mesmo assim conseguiu proporcionar uma cobertura quase completa da área marítima em questão. Essa configuração, relativamente ao anterior, é mais eficiente no custo e sofre menos interferência, em contrapartida, é um sistema mais complexo e em caso de uma das antenas falhar o sistema perde a sua capacidade de detecção.

Parâmetros do Radar	Latitude	Longitude	$H[m]$
Porto Grande (S.Vicente) ( $T_x$ )	16.890788	-24.993058	55
Porto Novo (Santo Antão) ( $R_x$ )	17.022153	-25.044417	45

TABELA 3.4: Cenário 1 - Resultado Simulação 3 -  $H$  é a altura das antenas acima do nível do mar.

### 3.2.2 Cenário 2: Cobertura das Rotas Marítimas de Cabo Verde Verde

Neste cenário, o objetivo é planejar um sistema de radares de vigilância costeira que possa garantir um controle eficiente do tráfego marítimo nas rotas do Grupo ETE em Cabo Verde. O foco principal é garantir uma cobertura abrangente e confiável dessas rotas, permitindo a detecção precoce de embarcações e garantindo a segurança da navegação.

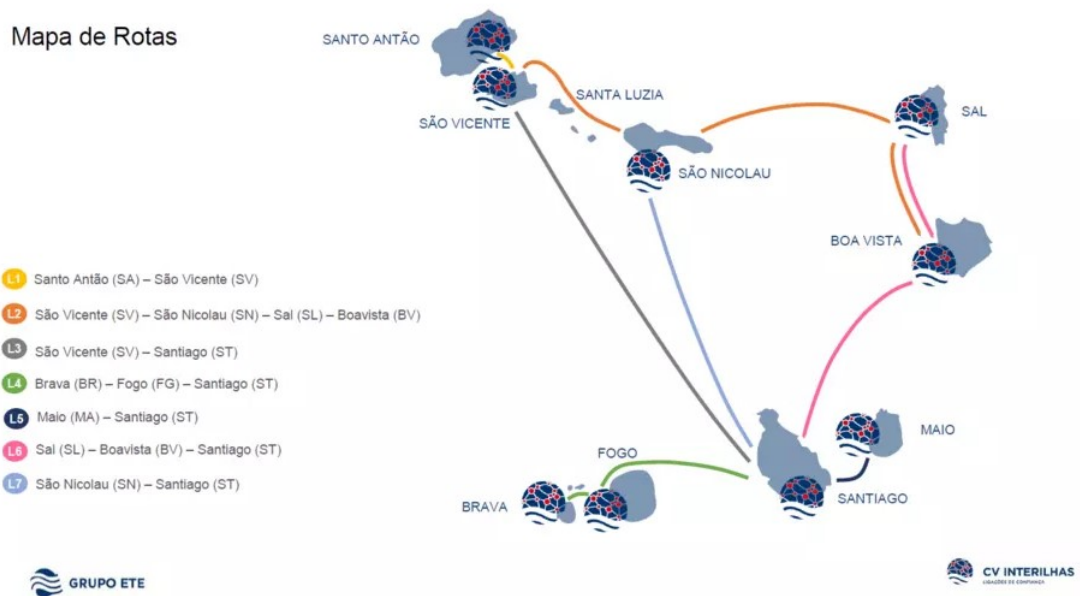


FIGURA 3.6: Mapa de Rotas em Cabo Verde Grupo ETE.  
 Fonte: <https://www.rfi.fr/pt/cabo-verde/20190815-entra-em-funcionamento-nova-concessao-de-transporte-maritimo>

Para esta simulação, os parâmetros dos radares foram baseados no modelo SENTINEL-800, de modo a fornecer maior área de cobertura. Foi adotado um RCS de 20 m<sup>2</sup>, o que representa embarcações como os *Ferrys*, usadas nessas rotas.

Parâmetros do Radar	Valores Tx	Valores Rx
Frequência	9.25 GHz	N/A
Ganho das antenas	38 dB	38 dB
Potência Transmitida	800W	N/A
SNR de Limiar de detecção (threshold)	N/A	13 dB
Número de impulsos	54	N/A
Largura do pulso	95 $\mu$ s	N/A
Perdas do sistema eletrônico	12 dB	
Temperatura do ruído	258K	
Secção Transversal Eficaz (RCS)	20 m <sup>2</sup>	

TABELA 3.5: Cenário 2 - Parâmetros dos radares. “N/A” significa que determinado parâmetro não pertence a tal componente e os valores em células unidas são os parâmetros pertencente sistema.

Nesse cenário serão apresentados duas simulações, uma com quatro antenas transmissoras e uma com uma antena transmissora e três recetoras, sendo este ultimo uma configuração bi-estática. A simulação apresentará as antenas em posições que garantem maior alcance de modo a ter maior cobertura das rotas de trânsito marítimo apresentadas na figura 3.6.

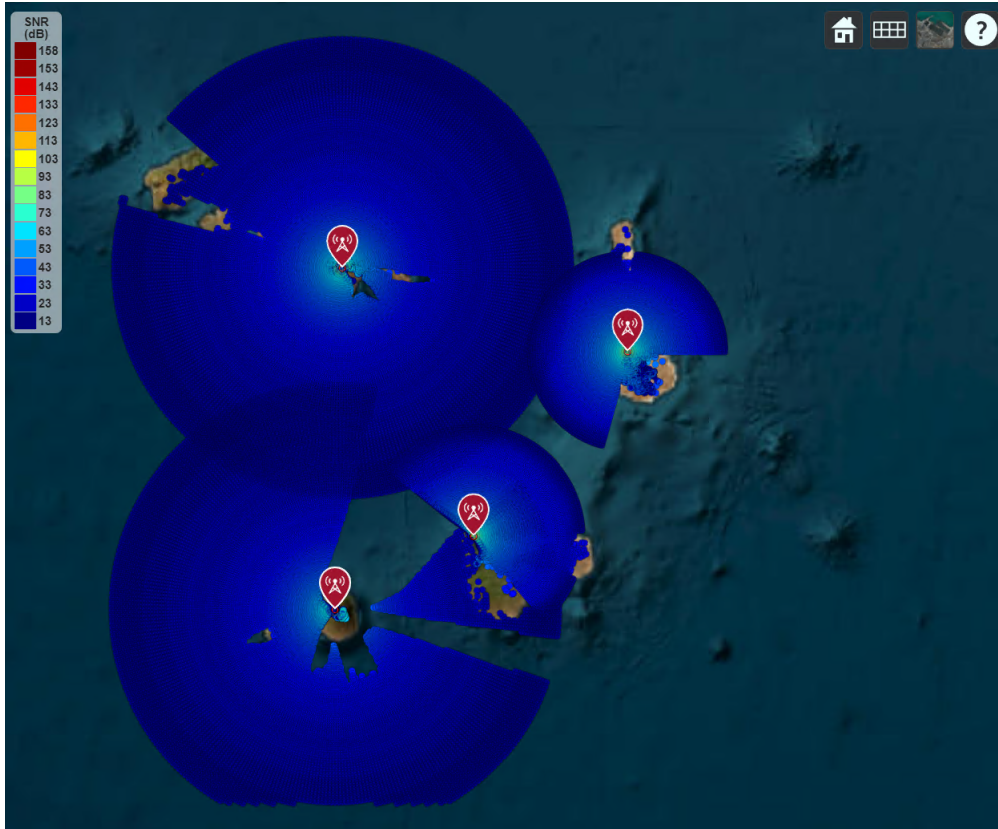


FIGURA 3.7: Cenário 2 - Simulação 1: Configuração com 4 antenas. A cobertura atinge o limite da área, criando um efeito de recorte na área de cobertura.

Essa configuração garante que a maioria das rotas de tráfego do grupo ETE em Cabo Verde tenham cobertura, entretanto é notável a presença de algumas áreas de sombra provocada pelas ilhas. Os radares da ilha de Santiago e de Boavista são as que proporcionam menor cobertura, pelo que, o ideal seria encontrar outras localizações para instalar os radares.

Ilhas	Latitude	Longitude	$H_{Tx}[m]$	$R[m]$
<b>São Nicolau</b>	16.621629	-24.355097	1293	123141
<b>Boavista</b>	16.215341	-22.912306	137	121502
<b>Santiago</b>	15.319276	-23.689554	180	52332
<b>Fogo</b>	14.960742	-24.392166	2684	58454

TABELA 3.6: Cenário 2 - Resultado Simulação 1 -  $H_{Tx}$  é a altura das antenas acima do nível do mar e  $R$  é o raio de cobertura.

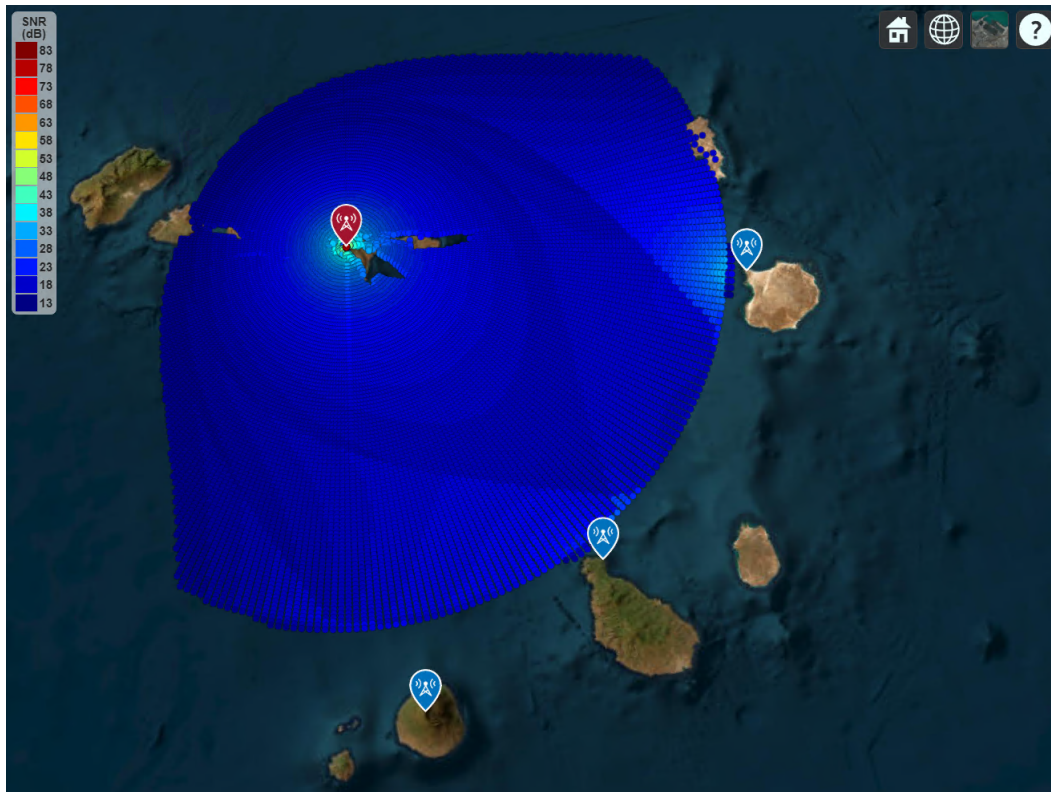


FIGURA 3.8: Cenário 2 - Simulação 2 Configuração de um sistema bi-estático.

A segunda simulação do cenário 2 consiste num sistema bi-estático com as antenas posicionadas nas mesmas posições que as antenas da primeira simulação do mesmo cenário. Nessa simulação a cobertura conta com menos zonas de sombra. A simulação foi feita com um alcance máximo menor do que a distância entre o transmissor e o recetor, existindo o erro em que não aparece a cobertura na proximidade das antenas. em contrapartida, por usar uma única antena transmissora, as áreas mais afastadas não possuem cobertura.

Ilhas	Latitude	Longitude	$H[m]$
São Nicolau	16.621629	-24.355097	1293
Boavista	16.215341	-22.912306	137
Santiago	15.319276	-23.689554	180
Fogo	14.960742	-24.392166	2684

TABELA 3.7: Cenário 2 - Resultado Simulação 2 -  $H$  é a altura das antenas acima do nível do mar.

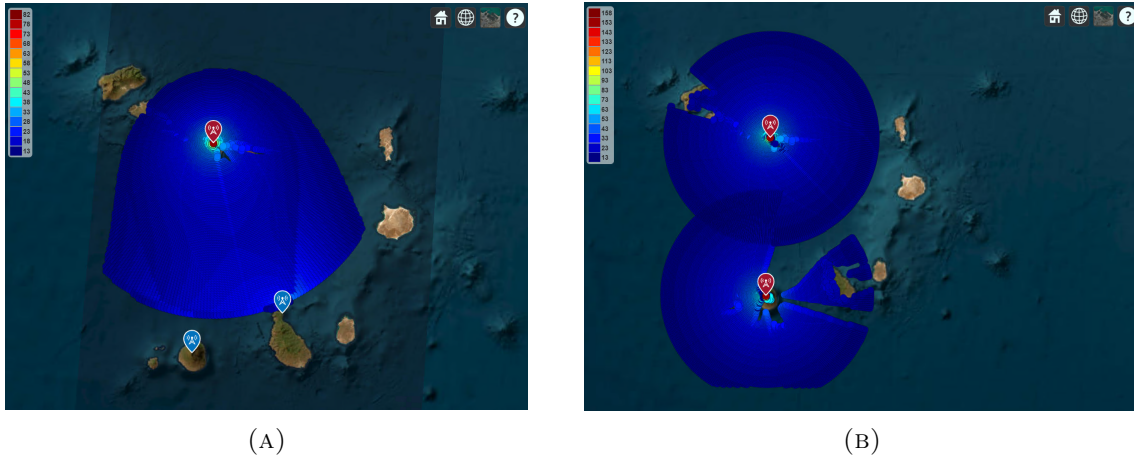


FIGURA 3.9: (A) Otimização da configuração mono-estática, (B) Otimização da configuração bi-estática

A otimização consiste em encontrar a configuração ideal do sistema radar de modo a maximizar a cobertura e desempenho conforme os parâmetros previamente definidos. Na configuração bi-estática foi feita uma otimização onde o objetivo era ter apenas duas das três antenas receptoras e as antenas situadas na ilha de Santiago e na ilha do Fogo são as que maximizam a cobertura, enquanto na configuração mono-estática, as antenas que maximizam a cobertura são as da ilha de São Nicolau e da ilha do Fogo. Por terem todos os mesmos parâmetros, as antenas situadas nas posições de maior elevação tiveram as maiores coberturas.

Esses foram exemplos de caso de uso do simulador, em que o utilizador pode usar a ferramenta para planejar a melhor configuração para um sistema radar que maximiza a cobertura de uma determinada área desejada, evitando as zonas de sombra e diminuir custos no projeto. As simulações mostraram-se alinhadas com os conceitos teóricos apresentadas no capítulo 1, pelo que o seu uso, após melhorias dos códigos, pode ter impacto significativo no planeamento de sistemas radares.

# Conclusão

Este trabalho marca um passo significativo na criação de um simulador de cobertura de radar personalizado, destinado a auxiliar o planeamento de sistemas de vigilância costeira. Através do desenvolvimento e aplicação deste simulador, foram obtidos resultados que destacam a sua viabilidade como ferramenta valiosa para a análise e tomada de decisões no contexto da Guarda Costeira de Cabo Verde. Embora algumas limitações tenham sido identificadas ao longo deste processo, elas mostraram-se cruciais para o aprimoramento contínuo do simulador.

## 3.2.3 Discussão

O simulador mostrou conseguir entregar resultados satisfatórios das coberturas, podendo identificar as zonas de sombra, receber diferentes configurações de radar e permitir o uso de funcionalidades adicionais como guardar e carregar as simulações anteriores, aprimorar com uma função de otimização e poder escolher o alcance máximo da cobertura, implicando diretamente na resolução e eficiência com que os resultados são apresentados.

No entanto, como foi visto no capítulo 2, a dinâmica de uso do simulador revelou alguns desafios, sendo fundamental considerá-los para a evolução do projeto. O reconhecimento das limitações geográficas, que atualmente abrangem apenas uma parcela da Zona Económica Exclusiva de Cabo Verde, direciona a importância de expandir a base de dados geográficos. A ponderação entre a resolução dos dados e o consumo de recursos computacionais também surge como um fator crítico a ser equilibrado.

A função *Otimizar* utiliza todas as combinações possíveis de radares, o que pode levar a um elevado número de combinações de possibilidades, resultando num tempo de execução elevado para inúmeros radares. Implementações mais avançadas podem usar técnicas de otimização mais eficientes. Também a função considera apenas a maximização da área de cobertura não sobreposta. Outros fatores, como a capacidade de deteção de alvos pequenos, a robustez da rede de radares e os custos

associados à instalação de cada radar, também podem ser importantes em decisões reais.

As limitações do software, como a incapacidade de selecionar, modificar e apagar individualmente as antenas no SiteViewer e a necessidade de reiniciar o processo de simulação após o uso da função “Limpar”, mostram áreas onde a usabilidade pode ser melhorada.

## Trabalhos futuros

Além dos avanços conquistados nesta tese, há várias direções promissoras que podem ser exploradas para aprimorar e expandir o simulador de cobertura de radar.

Transformar o simulador num software de código aberto seria uma forma de fomentar a colaboração e a participação de uma comunidade mais ampla. Isso permitiria que desenvolvedores de diferentes origens contribuíssem com melhorias e recursos adicionais, sem a necessidade de adquirir licenças do MatLab, o que implicará na superação das limitações identificadas na plataforma atual e permitirá um ambiente de desenvolvimento mais flexível.

Explorar a possibilidade de desenvolver funções específicas do zero, permitindo um maior controle sobre os parâmetros da equação do radar. Isso poderia aumentar a precisão e personalização do simulador para cenários específicos. Um exemplo é o desenvolvimento da função *coverage* com a implementação do modelo de *Longley-Rice*.

Aplicar ao simulador, um algoritmo poderoso que implementa o problema da localização de máxima cobertura, o que será um complemento ao algoritmo de otimização usado no simulador.

Considerar abordagens mais avançadas de otimização, como algoritmos genéticos, algoritmos de enxame de partículas ou algoritmos de otimização baseados em inteligência artificial. Essas abordagens podem lidar melhor com o desafio da complexidade computacional e considerar vários fatores e restrições ao mesmo tempo.

Investigar formatos de arquivos mais eficientes poderia mitigar os desafios de armazenamento e o desempenho do simulador. Manter a melhor resolução possível enquanto otimiza recursos computacionais seria um objetivo.

Criar uma base de dados de radares comerciais existentes, semelhantes aos utilizados nas simulações, pode ser um recurso valioso para os utilizadores. Isso

permitiria o acesso a perfis de radares reais e facilitaria a análise comparativa. Também uma base de dados com informações de diferentes regiões do globo terrestre de modo que o simulador não fique restrito somente à região de Cabo Verde.

Realizar testes de campo para validar empiricamente os resultados do simulador em comparação com medições reais. Isso fortaleceria a confiabilidade do simulador e a sua aplicabilidade prática.

Essas sugestões apontam para um futuro rico em aprimoramentos e inovações no simulador de cobertura de radar, fortalecendo ainda mais a sua utilidade e impacto nas áreas de segurança marítima e planeamento costeiro.

Em resumo, esta tese não apenas apresenta um simulador funcional, mas também destaca o seu potencial para melhorar a segurança marítima em Cabo Verde. Com um foco contínuo na evolução, aprimoramento e colaboração, podemos consolidar um simulador mais robusto e confiável que atenda de maneira eficaz às necessidades da Guarda Costeira de Cabo Verde e contribua para um ambiente marítimo mais seguro e protegido.



# Bibliografia

- Antonini, A., Melani, S., Corongiu, M., Romanelli, S., Mazza, A., Ortolani, A., & Gozzini, B. (2017). On the implementation of a regional X-band weather radar network. *Atmosphere*, 8(2), 25.
- Antonio, N. P., Fornazin, M., & de Araujo, R. M. (2018). Metodologia de Pesquisa de Estudo de Caso em Sistemas de Informação. *Sociedade Brasileira de Computação*.
- Bole, A. G., Wall, A. D., & Norris, A. (2013). *Radar and ARPA manual: radar, AIS and target tracking for marine radar users*. Butterworth-Heinemann.
- Budge, M. C., & German, S. R. (2020). *Basic RADAR analysis*. Artech House.
- David, K. (1998). *Radar Technology Encyclopedia/Electronic Edition*.
- Dod, U. (2000). *Performance specification digital terrain elevation data (dted)* (rel. téc.). Tech. rep., MIL-PRF-89020B.
- Furtado, A., & Nogueira, W. S. (s.d.). Coordenadora–Dr<sup>a</sup> Evânia dos Santos–Unidade de Coordenação do Cadastro Predial Coordenador Sênior–Dr. Sandro Semedo–Unidade de Coordenação do Cadastro Predial Coordenador Sênior–Arq. <sup>a</sup> Mira Évora–Direcção Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano.
- Garcia, F. P. (2017). CABO VERDE EO ESPAÇO DO ATLÂNTICO. *AUSTRAL: Brazilian Journal of Strategy & International Relations*, 6(11).
- Gomes, M. B. T. (2017). Development of a simulator of light-matter interaction using GPGPU: from plasmas to atomic gases.
- Hufford, G. A., Longley, A. G., Kissick, W. A., et al. (1982). *A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode*. US Department of Commerce, National Telecommunications; Information . . .
- Lim, Y. L. (2013). *The modelling and simulation of passive bistatic radar*. (tese de doutoramento).
- Ludeno, G., & Uttieri, M. (2020). *Radar Technology for Coastal Areas and Open Sea Monitoring*. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Mahafza, B. R. (2000). Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB.

- 
- MathWorks, T. (s.d.). *Planning Radar Network Coverage over Terrain*. <https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/planning-radar-network-coverage-over-terrain.html>
- Meikle, H. (2008). *Modern radar systems*. Artech House.
- Meslot, V. (2014). Enhancing radar maritime surveillance in coastal areas using DTM.
- Moniz, N. M. d. P. (2019). *Análise de operações SAR no espaço marítimo de Cabo Verde* (tese de doutoramento).
- Pilch, C. (2016). Development of an event-based simulator for model checking hybrid Petri nets with random variables. *Master's thesis, Univ. of Münster*.
- Reid, S. (2013). *Software and systems engineering Software testing Part 1: Concepts and definitions* (rel. téc.). ISO/IEC/IEEE 29119-1.
- Richards, M. A., Scheer, J., Holm, W. A., & Melvin, W. L. (2010). *Principles of modern radar* (Vol. 1). Citeseer.
- Sanches, F. M. (2018). *A Organização Institucional do Sector Marítimo e Portuário em Cabo Verde* (tese de doutoramento).
- Sénica, A. L. (2020). *Deteção de Alvos em Sistemas de Radares Passivos* (tese de doutoramento).
- Seybold, J. S. (2005). *Introduction to RF propagation*. John Wiley & Sons.
- Skolnik, M. I. (2008). *Radar handbook*. McGraw-Hill Education.
- Sophocles, J. (2003). Orfanidis, 'Electromagnetic waves and antennas.
- Souza, T. (2018). Testes de Desempenho de Software: Teoria e Prática. *Sociedade Brasileira de Computação*.
- Varela, S. P. R. (2015). Cluster do mar e desenvolvimento de Cabo Verde: constrangimentos e propostas de solução.

# Apêndice A - - Lista de Códigos auxiliares

## A.1 Tratamento dos dados

```
1 clc
2 clear
3
4 % Lista de caminhos para os arquivos de terreno
5 filePaths = {'arquivo1.dt2',...
6 'arquivo2.dt2','arquivo5.dt2','arquivo6.dt2','arquivo8
7 .dt2','arquivo10.dt2','arquivo11.dt2','arquivo12.
8 dt2','arquivo14.dt2','arquivo15.dt2'};
9
10 %Variaveis para armazenar dados de elevacao
11 elevat = {'Z1', 'Z2', 'Z3', 'Z4', 'Z5', 'Z6', 'Z7', '
12 Z8', 'Z9', 'Z10'};
13
14 %Variaveis para armazenar informacoes sobre as
15 rasterizacoes
16 rasters = {'R1', 'R2', 'R3', 'R4', 'R5', 'R6', 'R7', '
17 R8', 'R9', 'R10'};
18
19 %Variaveis de inicializacao para armazenar as matrizes
20 de longitude
21 longitude = {'lon1', 'lon2', 'lon3', 'lon4', 'lon5', '
22 lon6', 'lon7', 'lon8', 'lon9', 'lon10'};
23
24 %Variaveis de inicializacao para armazenar as matrizes
25 de latitude
26 latitude = {'lat1', 'lat2', 'lat3', 'lat4', 'lat5', '
27 lat6', 'lat7', 'lat8', 'lat9', 'lat10'};
```

```
20 %Este loop percorre cada caminho de arquivo em
    filePaths, le os dados de elevacao e as
    informacoes da rasterizacao usando a funcao
    readgeoraster, armazena os dados de elevacao e as
    informacoes de rasterizacao nas celulas
    apropriadas e cria matrizes/grades de latitude e
    longitude usando a funcao meshgrid.
21 for n = 1:length(filePaths)
22     [Z, R] = readgeoraster(filePaths{n});
23
24     elevat{n}=double(Z);
25     rasters{n}=R;
26
27     [longitude{n}, latitude{n}] = meshgrid(rasters{n}.
        LongitudeLimits(1):rasters{n}.
        SampleSpacingInLatitude:rasters{n}.LongitudeLimits
        (2),rasters{n}.LatitudeLimits(2):rasters{n}.
        SampleSpacingInLongitude:rasters{n}.LatitudeLimits
        (1));
28 end
29
30 %vetor de celulas para armazenar matrizes de elevacoes
    iguais a zero.
31 elevatzero = {'Z01'};
32
33 %Este loop preenche o vetor de celulas elevatzero com
    matrizes de elevacoes iguais a zeros de tamanho
    3601x3601.
34 for n = 1:length(elevatzero)
35     elevatzero{n}=zeros(3601,3601);
36 end
37
38 %criacao da matriz usando concatenacao de matrizes de
    elevacao, grades de latitude e longitude, incluindo
    matrizes zeradas de elevacao.
```

```
39 elevatfinal = [horzcat(elevat(1,1), elevat(1,2),
    elevatzero(1,1), elevatzero(1,1));horzcat(elevat
    (1,3), elevat(1,4), elevatzero(1,1), elevat(1,5));
    horzcat(elevatzero(1,1), elevat(1,6), elevat(1,7),
    elevat(1,8));horzcat(elevatzero(1,1), elevat(1,9),
    elevat(1,10), elevatzero(1,1))];
40
41 %os dados sao separedos em dois conjuntos de modo a
    que o processo de interpolacao nao seja limitado
    pela memoria do computador, dividindo os dados a
    interpolacao eh mais rapida e usa menos recursos
    computacionais
42 %primeira metade
43 elevlinha = [horzcat(elevat(1,1), elevat(1,2),
    elevatzero(1,1), elevatzero(1,1));horzcat(elevat
    (1,3), elevat(1,4), elevatzero(1,1), elevat(1,5))];
44
45 %segunda metade
46 elevlinha2 = [horzcat(elevatzero(1,1), elevat(1,6),
    elevat(1,7), elevat(1,8));horzcat(elevatzero(1,1),
    elevat(1,9), elevat(1,10), elevatzero(1,1))];
47
48 %os dados de elevacao sao tratados, convertendo as
    celulas em uma matriz, tratando valores invalidos
    (-32767 que representam falta de informacao) como
    NaN, interpolando os dados NaN usando a funcao
    griddata e, em seguida, substituindo os NaN
    interpolados de volta na matriz.
49 %interpolacao da primeira metade
50 elev_unica = cell2mat(elevlinha);%Converte calulas em
    matriz
51 [xq, yq] = meshgrid(1:size(elev_unica,2), 1:size(
    elev_unica,1)); %Cria grades de coordenadas
52 elev_unica(elev_unica == -32767) = NaN; %Substitui
    valores invalidos por NaN
```

```
53 elev_interp = griddata(xq(~isnan(elev_unica)), yq(~
    isnan(elev_unica)), elev_unica(~isnan(elev_unica)),
    xq, yq); %Interpola os dados NaN (interpolacao
    linear como padrao)
54 elev_unica(isnan(elev_unica)) = elev_interp(isnan(
    elev_unica)); %Substitui os NaN interpolados
55
56 %interpolacao da segunda metade
57 elev_unica2 = cell2mat(elevlinha2); %Converte calulas
    em matriz
58 [xq2, yq2] = meshgrid(1:size(elev_unica2,2), 1:size(
    elev_unica2,1)); %Cria grades de coordenadas
59 elev_unica2(elev_unica2 == -32767) = NaN; %Substitui
    valores invalidos por NaN
60 elev_interp2 = griddata(xq2(~isnan(elev_unica2)), yq2
    (~isnan(elev_unica2)), elev_unica2(~isnan(
    elev_unica2)), xq2, yq2); %Interpola os dados NaN (
    interpolacao linear como padrao)
61 elev_unica2(isnan(elev_unica2)) = elev_interp2(isnan(
    elev_unica2)); %Substitui os NaN interpolados
62
63 %concatenacao das duas metades dos dados interpolados
64 eleva_final = [elev_unica;elev_unica2];
65
66 %guarda os novos dados
67 save('elevacaoFd2.mat', 'eleva_final')
```

## A.2 Introduzir dos ficheiros dt2

```
1 clc
2 clear
3
4 filePaths = {'arquivo1.dt2',...
5 'arquivo2.dt2',...
6 'arquivo5.dt2',...
7 'arquivo6.dt2',...

```

### A.3. Remoção dos ficheiros dt2

---

```
8 'arquivo8.dt2',...
9 'arquivo10.dt2',...
10 'arquivo11.dt2',...
11 'arquivo12.dt2',...
12 'arquivo14.dt2',...
13 'arquivo15.dt2'}; %ficheiros dt2, introduzir o caminho
    dos ficheiros caso nao esteja na mesma pasta do
    ficheiro .m
14
15 attribution = "SRTM 1 arc-second resolution.
    Resolution (approximately 40 meters) " + ...
16 "from USGS Earthexplorer (https://earthexplorer.
    usgs.gov/)."; %descricao dos ficheiros a serem
    introduzidos
17
18 addCustomTerrain('cavoverde',filePaths,"Attribution",
    attribution, 'FillMissing',true); %esse trecho do
    codigo para adicionar os dados do terreno no
    siteviewer
```

### A.3 Remoção dos ficheiros dt2

```
1 clc
2 clear
3
4 removeCustomTerrain("cavoverde"); %esse trecho do
    codigo remove os dados do terreno introduzidos do
    siteviewer
```



## Apêndice B - - Lista de Códigos que compõem o simulador

### B.1 monostatic.m

```
1 function [Den_potenc, potenMax, sensibilidade, pdata] =  
    monostatic (rdrtxs, rdrxs, antgainlin, tgtrcs,  
    sensibilidade1, lossys, pulsowid, temperatura, Numpul,  
    almax)  
2 %Este código calcula a cobertura de radar para cada  
    radar em relação aos alvos, calcula a potência de  
    recepção e armazena os resultados para análise  
    posterior.  
3  
4 %Arquivos com os dados do terreno (Matrizes de 3  
    dimensões com a elevação e as coordenadas)  
5 load('elevacaoFd2.mat');  
6 load('latituded2.mat');  
7 load('longituded2.mat');  
8  
9 %Atribui valores aos parâmetros de tempo de pulso,  
    constante de Boltzmann, temperatura, número de  
    pulsos e perdas do sistema. Também multiplica almax  
    por 1000 para convertê-lo para metros.  
10 tau = pulsowid;  
11 k = physconst('Boltzmann');  
12 T = temperatura;  
13 Nim = Numpul;  
14 perdas = 10.^(lossys./10);  
15 almax1 = almax*1000;  
16  
17 %Atribui os dados de elevação, latitude e longitude as  
    variáveis correspondentes.  
18 elevacao = eleva_final;  
19 latitus = latitudeFinalcat(:,1);  
20 longitus = longitudeFinalcat(1,:);  
21
```

```

22 %Calcula o SNR de Limiar de detecao convertendo a
    escala de dB para a escala linear.
23 sensibilidade = (10.^(sensibilidade1./10));
24
25 %Inicializacao das celulas pdata e potenMax para
    armazenar os dados de cobertura e potencia maxima,
    respectivamente
26 pdata = cell(1, numel(rdrtxs));
27 potenMax = cell(1, numel(rdrtxs));
28
29 % Para cada radar, verifica a frequencia do
    transmissor e escolhe um modelo de propagacao
    apropriado. Calcula a cobertura usando a funcao
    coverage e armazena os dados em pdata. Obtem as
    coordenadas dos alvos a partir dos dados de
    cobertura.
30 for i = 1:numel(rdrtxs)
31     if rdrtxs(i).TransmitterFrequency >= 20e6 &&
        rdrtxs(i).TransmitterFrequency <= 20e9
32         pm = propagationModel("longley-rice", "
        ClimateZone", "maritime-subtropical");
33     else
34         pm = propagationModel("freespace");
35     end
36     pdata{i} = coverage(rdrtxs(i), pm, 'MaxRange',
        almax1);
37     tttlats = pdata{i}.Data.Latitude;
38     tttlons = pdata{i}.Data.Longitude;
39 end
40
41 %Para cada radar, calcula a potencia de recepcao,
    aplica a equacao do SNR e armazena os valores em
    potenMax. Tambem armazena os pontos de potencia
    detetados em Power, Latitude e Longitude.
42 potencW = cell(1, numel(rdrtxs));
43 index = 1;
44 for n = 1:numel(pdata)

```

```
45 Dpotenc = pdata{n}.Data.Power;
46 tgtkons = pdata{n}.Data.Longitude;
47 tgtkats = pdata{n}.Data.Latitude;
48 rdrlatsm = rdrtxs(n).Latitude;
49 rdrlonsm = rdrtxs(n).Longitude;
50
51 %conversao de dBm para watts
52 potencW{n} = ((10.^(Dpotenc./10))./1000);
53
54 %calculo da percentagem de perda sofrida
55 potencW2 = (Pt-potencW{n})/Pt ;
56 potencWfinal = potencW{n}-(potencW{2}.*potencW2);
57
58
59 % potenRx sao os valores de SNR, aplicacao da
60 % formula do SNRimp
61 potencRx = ((potencWfinal.*tgtrcs.*antgainlin(n)^2.
62 *tau(n))./((k * T(n) * perdas(n)))).*Nim(n);
63 potencMax{n} = potencRx;
64 for yyy = 1:numel(potencRx)
65     if potencRx(yyy, 1) >= sensibilidade(n)
66         Power(index, 1) = 10 * log10(potencRx(yyy,
67 1));
68         Latitude(index, 1) = pdata{n}.Data.
69 Latitude(yyy, 1);
70         Longitude(index, 1) = pdata{n}.Data.
71 Longitude(yyy, 1);
72         index = index + 1;
73     end
74 end
75 end
76 % conversao dos vetores para uma tabela
77 tabelData =table(Latitude,Longitude,Power);
78
79 % dados a serem representados como graficos
80 Den_potenc = propagationData(tabelData);
81 end
```

## B.2 bistatic

```
1 function [Den_potenc,potenMax, sensibilidade,pdata] =  
    bistatic(rdrtxs,rdrxs,antgainlinrx,antgainlintx,  
    tgtrcs,sensibilidade1,losssys,pulsowid,temperatura,  
    Numpul, almax)  
2 % Este codigo calcula a cobertura de radar para a  
    antena transmissora em relacao aos alvos e, para  
    cada antena receptora, calcula a potencia de  
    recepcao e armazena os resultados para analise  
    posterior.  
3  
4 %ficheiro com os dados do terreno (Matriz de 3  
    dimensoes com a elevacao e as coordenadas)  
5 load('elevacaoFd2.mat');  
6 load('latituded2.mat');  
7 load('longituded2.mat');  
8  
9 %Atribui valores aos parametros de tempo de pulso,  
    constante de Boltzmann, temperatura, numero de  
    pulsos e perdas do sistema. Tambem multiplica almax  
    por 1000 para converte-lo para metros.  
10 tau =pulsowid;  
11 k = physconst('Boltzmann');  
12 T = temperatura;  
13 Nim = Numpul;  
14 perdas=10.^(losssys./10);  
15 potenMax = cell(1, numel(rdrxs));  
16 almax1 = almax*1000;  
17  
18 %SNR do Limiar(Conversao de dB para watt)  
19 sensibilidade=(10.^(sensibilidade1./10));  
20
```

```
21 % Atribui os dados de elevacao , latitude e longitude
    as variaveis correspondentes .
22 elevacao = eleva_final;
23 latitus=latitudeFinalcat(:,1);
24 longitus=longitudeFinalcat(1,:);
25
26 % Escolha e calculo da cobertura de acordo com a
    frequencia do transmissor
27 if rdrtxs.TransmitterFrequency >= 20e6 && rdrtxs.
    TransmitterFrequency <= 20e9
28     pm=propagationModel("longley-rice");
29 else
30     pm=propagationModel("freespace");
31 end
32
33 % calculo da cobertura da antena Tx
34 pdata = coverage(rdrtxs, pm, 'MaxRange',almax1);
35
36 % dados das coordenadas a serem usadas no calculo das
    distancias
37 tgmtlats = pdata.Data.Latitude;
38 tgmtlons = pdata.Data.Longitude;
39
40 %Inicializa a celula tbelaDat para armazenar os dados
    de densidade de potencia.
41 tbelaDat = cell(4, numel(rdrtxs));
42
43 %extraí os valores de densidade de potencia, longitude
    e latitude, e armazena os valores de densidade de
    potencia em tbelaDat.
44 for ii=1:numel(pdata)
45     Dpotenc = pdata.Data.Power;%valores da densidade
    de potencia
46     tgmtlons=pdata.Data.Longitude;%Longitudes;
47     tgmtlats=pdata.Data.Latitude;%Latitudes;
48     tbelaDat{3, ii} = Dpotenc;
49     index = 1;
```

```

50
51     % Para cada antena receptora, calcula as
distancias, o SNRimp e armazena os valores em
potenMax.
52     for n=1:numel(rdrxr)
53         rdrlats=rdrxr(n).Latitude;
54         rdrlons=rdrxr(n).Longitude;
55
56         ds = distance_dsxr(rdrlats,rdrlons,tgtrons,
tgtrats,elevacao,latitus,longitus);
57         drv=((4*pi)^2).*(ds.^2);
58
59         % conversao de dBm para watts
60         potencW = (10.^(Dpotenc./10))./1000;
61
62         % aplicacao da formula do SNRimp
63         potenRx = ((potencW.*(tgtrcs*antgainlinrx(n)*
antgainlintx*tau(n)))./(drv.*(k*T(n)*perdas(n))).*
Nim;
64         potenMax{n} = potenRx;
65
66         for yyy=1:numel(potenRx)
67             if potenRx(yyy,1) >= sensibilidade(n)
68                 Power(index,1) = 10*log10(potenRx(yyy
,1));
69                 Latitude(index,1) = pdata.Data.
Latitude(yyy,1);
70                 Longitude(index,1) = pdata.Data.
Longitude(yyy,1);
71                 index = index + 1;
72             end
73         end
74     end
75 end
76 % conversao dos vetores para uma tabela
77 tabelData =table(Latitude,Longitude,Power);
78

```

```
79 % dados a serem representados como graficos
80 Den_potenc = propagationData(tabelData);
81 end
```

## B.3 *distance\_ds*

```
1 function d = distance_ds(rdrlatsm,rdrlonsm,tgtlons,
2   tgtlats,elevacao,latitus,longitus)
3
4   %Essa funcao calcula a distancia entre a antena
5   receptora e os pontos alvo levando em consideracao
6   as elevacoes. E uma parte importante do processo de
7   calculo da potencia de recepcao em sistemas de
8   radar.
9
10
11  %raio medio da Terra em metros para ser usado na
12  firmula de Haversine
13  R = 6371000;
14
15  %Atribui os valores de latitude e longitude da antena
16  receptora aos novos nomes de variaveis.
17  rdrlats=rdrlatsm;
18  rdrlons=rdrlonsm;
19
20
21  %Inicializa uma matriz d com zeros, onde cada elemento
22  representa a distancia entre uma antena recetora e
23  um ponto alvo.
24  d = zeros(size(tgtlats,1),size(rdrlats,2));
25
26  %Loop duplo para percorrer todas as combinacoes
27  possiveis entre as coordenadas da antena recetora e
28  os pontos alvo.
29  for xx = 1:numel(rdrlats)
30    for yy = 1:numel(tgtlons)
```

```
18     %Para cada combinacao, calcula os indices das
19     latitudes e longitudes mais proximas nas matrizes
20     de coordenadas (latitus e longitus) para a antena
21     recetora e o ponto alvo.
22     [~, idx_lat1] = min(abs(latitus(:)-rdrlats(xx)
23     ));
24     [row_lat1, col_lat1] = ind2sub(size(latitus),
25     idx_lat1);
26     [~, idx_lon1] = min(abs(longitus(:)-rdrlons(xx)
27     ));
28     [row_lon1, col_lon1] = ind2sub(size(longitus),
29     idx_lon1);
30
31     [~, idx_lat2] = min(abs(latitus(:)-tgtlats(yy)
32     ));
33     [row_lat2, col_lat2] = ind2sub(size(latitus),
34     idx_lat2);
35     [~, idx_lon2] = min(abs(longitus(:)-tgtlons(yy)
36     ));
37     [row_lon2, col_lon2] = ind2sub(size(longitus),
38     idx_lon2);
39
40     %Obtem as elevacoes dos pontos correspondentes
41     das matrizes de elevacao para a antena recetora e
42     o ponto alvo.
43     elev1_m = elevacao(row_lat1,col_lon1);
44     elev2_m = elevacao(row_lat2,col_lon2);
45
46     %Obtem as latitudes e longitudes dos pontos
47     correspondentes das matrizes de coordenadas.
48     lat1 = latitus(row_lat1, col_lat1);
49     lon1 = longitus(row_lon1, col_lon1);
50     lat2 = latitus(row_lat2, col_lat2);
51     lon2 = longitus(row_lon2, col_lon2);
```

```
39         %Calcula as diferencas de latitude e longitude
        entre a antena recetora e o ponto alvo,
        convertendo para radianos.
40         dlat = deg2rad(lat2 - lat1);
41         dlon = deg2rad(lon2 - lon1);
42
43         %Calcula a distancia horizontal entre a antena
        receptora e o ponto alvo usando a formula de
        Haversine.
44         a = sin(dlat/2)^2 + cos(deg2rad(lat1)) * cos(
        deg2rad(lat2)) * sin(dlon/2)^2;
45         c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1-a));
46         d_hor = R * c;
47
48         %Calcula a diferenca de elevacao entre a
        antena receptora e o ponto alvo.
49         d_ver = abs(elev2_m - elev1_m);
50
51         %Calcula a distancia total, incluindo as
        componentes horizontal e vertical, e armazena na
        matriz d.
52         d(yy,xx) = sqrt(d_hor^2 + d_ver^2);
53     end
54 end
55 end
```

## B.4 distance\_dsxr

```
1 function dr = distance_dsxr(rdrlats,rdrlons,tgtlons,
    tgtlats,elevacao,latitus,longitus)
2 %Essa funcao calcula a distancia entre a antena
    receptora e os pontos alvo levando em consideracao
    as elevacoes. E uma parte importante do processo de
    calculo da potencia de recepcao em sistemas de
    radar.
3
```

```
4 %raio medio da Terra em metros para ser usado na
   formula de Haversine
5 R = 6371000;
6
7 %Inicializa uma matriz dr com zeros, onde cada
   elemento representa a distancia entre uma antena
   recetora e um ponto alvo.
8 dr = zeros(size(tgtlats,1),size(rdrlats,2));
9
10 %Loop duplo para percorrer todas as combinacoes
    possiveis entre as coordenadas da antena recetora e
    os pontos alvo.
11 for xx = 1:numel(rdrlats)
12     for yy = 1:numel(tgtlons)
13
14         %Para cada combinacao, calcula os indices das
           latitudes e longitudes mais proximas nas matrizes
           de coordenadas (latitus e longitus) para a antena
           recetora e o ponto alvo.
15         [~, idx_lat1] = min(abs(latitus(:)-rdrlats(xx)
           ));
16         [row_lat1, col_lat1] = ind2sub(size(latitus),
           idx_lat1);
17         [~, idx_lon1] = min(abs(longitus(:)-rdrlons(xx)
           ));
18         [row_lon1, col_lon1] = ind2sub(size(longitus),
           idx_lon1);
19
20         [~, idx_lat2] = min(abs(latitus(:)-tgtlats(yy)
           ));
21         [row_lat2, col_lat2] = ind2sub(size(latitus),
           idx_lat2);
22         [~, idx_lon2] = min(abs(longitus(:)-tgtlons(yy)
           ));
23         [row_lon2, col_lon2] = ind2sub(size(longitus),
           idx_lon2);
24
```

```
25         %Obtem as elevacoes dos pontos correspondentes
           das matrizes de elevacao para a antena recetora e
           o ponto alvo.
26         elev1_m = elevacao(row_lat1,col_lon1);
27         elev2_m = elevacao(row_lat2,col_lon2);
28
29         %Obtem as latitudes e longitudes dos pontos
           correspondentes das matrizes de coordenadas.
30         lat1 = latitus(row_lat1, col_lat1);
31         lon1 = longitus(row_lon1, col_lon1);
32         lat2 = latitus(row_lat2, col_lat2);
33         lon2 = longitus(row_lon2, col_lon2);
34
35         %Calcula as diferencas de latitude e longitude
           entre a antena recetora e o ponto alvo,
           convertendo para radianos.
36         dlat = deg2rad(lat2 - lat1);
37         dlon = deg2rad(lon2 - lon1);
38
39         %Calcula a distancia horizontal entre a antena
           receptora e o ponto alvo usando a formula de
           Haversine.
40         a = sin(dlat/2)^2 + cos(deg2rad(lat1)) * cos(
           deg2rad(lat2)) * sin(dlon/2)^2;
41         c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1-a));
42         d_hor = R * c; % Distancia horizontal
43
44         %Calcula a diferenca de elevacao entre a
           antena receptora e o ponto alvo.
45         d_ver = abs(elev2_m - elev1_m); % Diferenca de
           elevacao (distancia vertical)
46
47         %Calcula a distancia total, incluindo as
           componentes horizontal e vertical, e armazena na
           matriz dr.
48         dr(yy,xx) = sqrt(d_hor^2 + d_ver^2); %
           Distancia total (incluindo elevacao)
```

```
49     end
50 end
51 end
```

## B.5 melhorRadarSites

```
1 function [bestind, Den_potenc, coverageAreaPercentage]
   = melhorRadarSites(potenMax, sensibilidade, pdata,
   tipoSis, numAnt)
2 %essa funcao usa partes do codigo da funcao
   helperOptimizeRadarSites do matlab
3
4 %recebe varias entradas: potenMax (matrizes de
   potencia), sensibilidade (vetor de limiares de
   detecao), pdata (dados de cobertura de antenas),
   tipoSis (tipo do sistema, monoestatico ou
   biestatico) e numAnt (numero de antenas a
   selecionar).
5
6 %Determina o tamanho maximo entre as matrizes em
   potenMax para garantir que todas as matrizes tenham
   a mesma dimensao.
7 maxSize = max(cellfun(@(x) size(x, 1), potenMax));
8
9 % Ajusta as dimensoes das matrizes em potenMax para
   terem o mesmo tamanho (preenchendo com zeros).
10 for i = 1:numel(potenMax)
11     currentSize = size(potenMax{i}, 1);
12
13     % Aumente as dimensoes da celula usando
   preenchimento com zeros
14     if currentSize < maxSize
15         potenMax{i} = [potenMax{i}; zeros(maxSize -
   currentSize, size(potenMax{i}, 2))];
16     end
17 end
```

```
18
19 %Verifica se potenMax eh um array de celulas e se
    sensibilidade eh um vetor numerico.
20 if ~iscell(potenMax) || ~isnumeric(sensibilidade)
21     error('potenMax deve ser um array de celulas e
    sensibilidade deve ser um vetor numerico');
22 end
23
24 %Cria uma matriz de celulas que contem informacoes
    sobre quais alvos sao detectados por cada radar,
    comparando com os limiares de detecao.
25 isdetected = cellfun(@(x) x > sensibilidade, potenMax,
    'UniformOutput', false);
26
27 %Gera todas as combinacoes possiveis de radares,
    escolhendo numAnt deles.
28 numradars = numel(potenMax);
29 Cs = nchoosek(1:numradars, numAnt); % Selecciona
    combinacoes de n radares
30
31 %Calcula a area de cobertura de cada radar
    considerando alvos acima dos limiares de detecao.
32 radarCoverageAreas = zeros(numradars, 1);
33 for n = 1:numradars
34     radarCoverageAreas(n) = sum(potenMax{Cs(n,:)}(:) >=
    sensibilidade(n));
35 end
36
37 %Inicializa variaveis para armazenar os indices dos
    radares seleccionados e a area de cobertura nao
    sobreposta maxima encontrada.
38 bestind = [];
39 bestCoverageArea = 0;
40
```

```

41 %Itera sobre todas as combinacoes de radares ,
    calculando a area de cobertura nao sobreposta para
    cada combinacao e armazenando a melhor combinacao
    encontrada.
42 for cind = 1:size(Cs, 1)
43     C = Cs(cind, :);
44
45     % Combine coverage areas of selected radars
46     combinedCoverageArea = sum(radarCoverageAreas(C));
47
48     % Check for overlapping points between selected
    radars coverage areas
49     overlappingPoints = false(size(potenMax{1}));
50     for i = 1:numel(C)
51         overlappingPoints = overlappingPoints | (
    potenMax{C(i)} >= sensibilidade(C(i)));
52     end
53     combinedCoverageArea = combinedCoverageArea - sum(
    overlappingPoints(:));
54
55     % Update best combination of radars if coverage
    area is larger
56     if combinedCoverageArea > bestCoverageArea
57         bestCoverageArea = combinedCoverageArea;
58         bestind = C;
59     end
60 end
61
62 %Calcular a porcentagem da area de cobertura nao
    sobreposta em relacao a area total
63 totalCoverageArea = sum(radarCoverageAreas);
64 coverageAreaPercentage = bestCoverageArea /
    totalCoverageArea * 100;
65
66 index = 1;
67 Power = zeros(numel(bestind), 1);
68 Latitude = zeros(numel(bestind), 1);

```

```
69 Longitude = zeros(numel(bestind), 1);
70
71 if tipoSis == "Mono-estatico"
72     for n = 1:numel(potenMax)
73         if ismember(n, bestind)
74             for yyy = 1:numel(potenMax{1, n})
75                 if potenMax{1, n}(yyy, 1) >=
76                     sensibilidade(n)
77                         Power(index, 1) = 10 * log10(
78 potenMax{1, n}(yyy, 1));
79                         Latitude(index, 1) = pdata{n}.Data
80 .Latitude(yyy, 1);
81                         Longitude(index, 1) = pdata{n}.
82 Data.Longitude(yyy, 1);
83                         index = index + 1;
84                     end
85                 end
86             end
87         end
88     else
89         for n = 1:numel(potenMax)
90             if ismember(n, bestind)
91                 for yyy = 1:numel(potenMax{1, n})
92                     if potenMax{1, n}(yyy, 1) >=
93                         sensibilidade(n)
94                             Power(index, 1) = 10 * log10(
95 potenMax{1, n}(yyy, 1));
96                             Latitude(index, 1) = pdata.Data.
97 Latitude(yyy, 1);
98                             Longitude(index, 1) = pdata.Data.
99 Longitude(yyy, 1);
100                             index = index + 1;
101                         end
102                     end
103                 end
104             end
105         end
106     end
107 end
```

```
98 % conversao dos vetores para uma tabela
99 tabelData =table(Latitude,Longitude,Power);
100 % dados a serem representados como graficos
101 Den_potenc = propagationData(tabelData);
102 end
```