



# ESCOLA NAVAL

*talant de biefaire*



Afonso Lobo Sénica

## Detecção de Alvos em Sistemas de Radares Passivos

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



Escola Naval, 19 de Fevereiro de 2020





# ESCOLA NAVAL

*ta tant de bien faire*



Afonso Sénica

## Detecção de Alvos em Sistemas de Radares Passivos

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

Orientação de: Professor Paulo Alexandre Carapinha Marques

Co-orientação de: Professor João Luís Reis Fidalgo Neves

*O Aluno Mestrando,*

---

Afonso Lobo Sénica



*O Orientador,*

---

Paulo Alexandre Carapinha Marques

*O Co-Orientador,*

---

João Luís Reis Fidalgo Neves

Escola Naval, 19 de Fevereiro de 2020



A dedicatória tem por finalidade prestar homenagem ou dedicar o trabalho a alguém próximo ou que tenha um especial significado para o autor do trabalho.

É, também, um elemento facultativo na estrutura do trabalho, mas é usual que seja feita dedicando o trabalho aos pais, à família mais chegada ou a alguém com relevância especial na vida do autor.



# Agradecimentos

Agradecimento é a expressão registada de uma gratidão às pessoas, entidades ou instituições que, de algum modo, contribuíram para a elaboração do trabalho. Sendo um elemento opcional, quando exista deve incluir-se na frente de folha a colocar logo após a folha de rosto ou das folhas da epígrafe e/ou da dedicatória, deixando o verso em branco.





# Resumo

[Segue-se, com carácter obrigatório, um resumo em língua portuguesa e em língua inglesa (abstract), cada um deles com um máximo de 300 palavras.]

Um radar passivo é um sistema que não transmite energia eletromagnética durante o seu funcionamento. Ao invés, utiliza iluminadores de oportunidade e compara o seu sinal direto com pequenas alterações que ocorrem no campo eletromagnético de forma a detetar um alvo. (Griffiths e Baker 2017)

**Palavras-chave:** Radar, Passivo, Detecção, Processamento, Sinal



# Abstract

Trabalhos escritos em língua Inglesa devem incluir um resumo alargado com cerca de 1000 palavras, ou duas páginas.

Se o trabalho estivesse escrito em Português, este resumo seria em língua Inglesa, com cerca de 200 palavras, ou uma página.

Para alterar a língua basta ir às configurações do documento no ficheiro **main.tex** e alterar para a língua desejada ('english' ou 'portuguese')<sup>1</sup>. Isto fará com que os cabeçalhos incluídos no template sejam traduzidos para a respetiva língua.

**Keywords:** Radar, Passive, Detection, Processing, Signal

---

<sup>1</sup>Alterar a língua requer apagar alguns ficheiros temporários; O target **clean** do **Makefile** incluído pode ser utilizado para este propósito.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Sistemas Passivos para Detecção e Localização de Alvos . . . . .	1
1.2	Sistemas de Radar Definidos por Software . . . . .	2
1.3	Motivação e Objetivos . . . . .	2
1.4	Organização da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Radares Passivos</b>	<b>3</b>
2.1	Contextualização . . . . .	3
2.1.1	Conceitos Gerais Base . . . . .	3
2.1.2	Formação de Imagem . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Teoria de Antenas</b>	<b>5</b>
3.1	Teoria Básica de Antenas . . . . .	5
3.1.1	Tipos de Antenas . . . . .	5
3.1.2	Parâmetros Fundamentais . . . . .	9
3.2	Simulação de uma Antena . . . . .	16
3.2.1	Para Sinais DVB-T . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Processamento de Sinal</b>	<b>17</b>
4.1	Processamento de Sinais e Supressão de Clutter . . . . .	17
4.2	Simulação . . . . .	17
4.2.1	Sinais DVB-T . . . . .	17
4.3	Bases de Dados . . . . .	17
4.3.1	Formação de Imagem . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Aplicação</b>	<b>19</b>
5.1	Sistema Desenvolvido . . . . .	19
5.2	Resultados . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Conclusões e Discussão</b>	<b>21</b>
6.1	Sumário . . . . .	21
6.2	Discussão e Conclusões . . . . .	21

6.3 Cenários Possíveis - MARINHA . . . . .	21
<b>Conclusão</b>	<b>21</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>25</b>
<b>Apêndices</b>	<b>27</b>
<b>A Escreve o título do apêndice</b>	<b>27</b>
<b>Anexos</b>	<b>29</b>
<b>I Escreve o título do anexo</b>	<b>29</b>

# Lista de Figuras

3.1	Antena como meio de transição . . . . .	6
3.2	Antena de Fio . . . . .	7
3.3	Antena de Abertura . . . . .	7
3.4	Antena <i>Microstrip</i> . . . . .	8
3.5	Antena Refletora . . . . .	9
3.6	Diagrama de radiação direcional . . . . .	10
3.7	Diagrama de radiação omnidirecional . . . . .	11
3.8	Elementos caraterísticos do diagrama de radiação . . . . .	12
3.9	Campos E e H de um diagrama de radiação de uma antena . . . . .	13
3.10	Alterações típicas da forma do diagrama de radiação . . . . .	14





# Lista de Tabelas



# Lista de Abreviaturas

<b>UHF</b>	<b>Ultra High Frequency</b>
<b>SINR</b>	<b>Signal to Interference plus Noise Ratio</b>
<b>HPBW</b>	<b>Half Power BeamWidth</b>
<b>FNBW</b>	<b>First Null BeamWidth</b>



# Lista de Símbolos

$a$	distance	m
$D$	Diretividade	
$L$	dimensão da antena	m
$P$	Potência	W
$r$	raio	m
$U$	Intensidade de Radiação	W
$W$	Densidade de potência	W m <sup>-2</sup>
$\varphi$	ângulo polar	rad
$\theta$	azimute	rad
$\lambda$	comprimento de onda	m



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Sistemas Passivos para Detecção e Localização de Alvos

1. Introdução

1.1 Sistemas passivos para detecção e localização de alvos

1.1.1 Sub-subcapítulo

etc...

Aos capítulos e subcapítulos devem ser dados títulos, em letra destacada em negrito, de corpo sucessivamente 14, 13 e 12, sempre encostados à margem esquerda da página sem qualquer avanço.

Não é possível apresentar um critério único para o ordenamento de capítulos e subcapítulos, decorrendo esta estrutura da natureza do próprio trabalho, variando consoante a área disciplinar ou científica do mesmo e das suas características próprias.

Nalguns casos terá uma natureza explicativa, noutros passará pela exposição de resultados e sua interpretação, envolvendo a apresentação de critérios, tabelas de resultados, memória descritiva, etc.

Cada um dos capítulos deve começar ao cimo de uma página ímpar (à direita).

## **1.2    Sistemas de Radar Definidos por Software**

## **1.3    Motivação e Objetivos**

## **1.4    Organização da Dissertação**



# Capítulo 2

## Radares Passivos

### 2.1 Contextualização

#### 2.1.1 Conceitos Gerais Base

#### 2.1.2 Formação de Imagem



# Capítulo 3

## Teoria de Antenas

### 3.1 Teoria Básica de Antenas

Uma antena é definida como "um dispositivo geralmente metálico (com haste ou fio) para irradiar ou receber ondas de rádio"(Balanis 2016), ou seja, uma antena, é o dispositivo que permite a transição entre o meio que a rodeia e o equipamento, que se pode observar na Figura 3.1. Este dispositivo é um transdutor que converte energia elétrica em ondas eletromagnéticas ou vice versa, sendo que é uma antena de transmissão, se converter um sinal elétrico num sinal eletromagnético e é uma antena de receção, se converter um sinal eletromagnético em sinal elétrico.

#### 3.1.1 Tipos de Antenas

Neste subcapítulo irá ser introduzido de uma forma breve, os vários tipos de antenas, a sua utilização e vantagens entre estes.

#### Antenas de Fio

Estas antenas são umas das mais antigas, que apresentam uma configuração mais simples, como se pode observar na Figura 3.2, sendo apenas constituídas por um fio que pode variar na sua dimensão e na sua forma e ainda podem ser utilizadas nas mais variadas aplicações. Podem tomar uma forma aleatória, desde um fio direito (dipolo) até um fio com as mais diversas formas.

As antenas de fio podem ser encontradas nos mais variados locais, desde aeronaves, carros ou navios a edifícios.

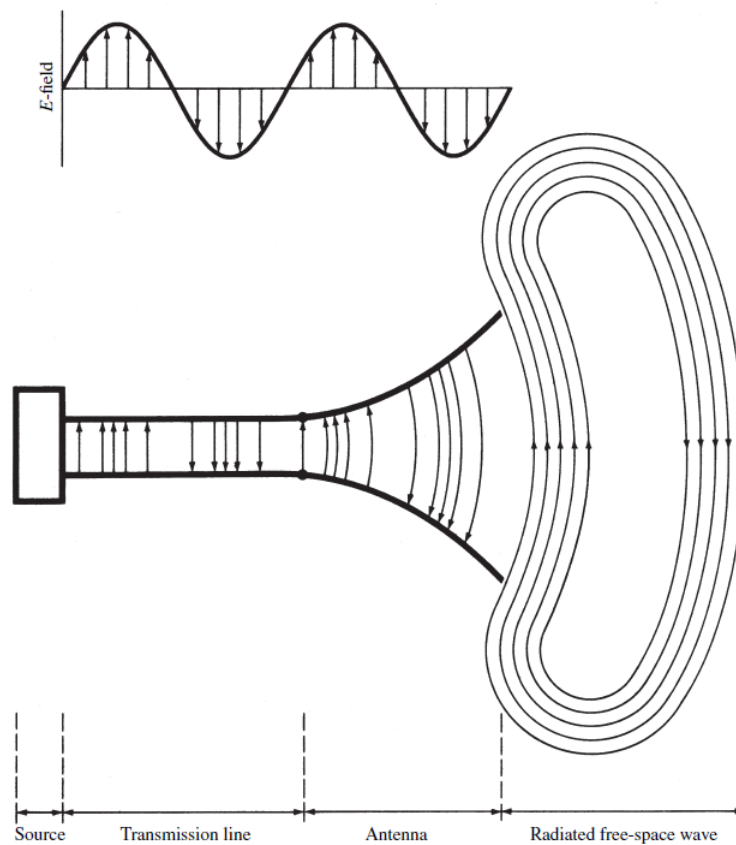


FIGURA 3.1: Antena como um meio de transição (Figura 1.1 - Balanis 2016)

## Antenas de Abertura

Os campos no fim de um guia de ondas aberto não são uniformes devido a esta mesma abertura, assim, para este caso, assume-se que os campos são iguais a como se o guia de ondas continuasse fechado. As antenas de abertura entram quando se pretende aumentar a diretividade à saída do guia, abrindo as extremidades do mesmo de forma a dar uma forma como se observa na Figura 3.3. Este tipo de antenas, em específico as antenas de abertura piramidais, são utilizadas para alimentar ou calibrar grandes antenas de prato.

Assim sendo, as antenas de abertura são utilizadas para frequências mais elevadas, especificamente em frequências de micro-ondas e podem ser aplicadas nas mais variadas formas geométricas, como retangulares, elípticas, circulares, piramidais, entre outras.



FIGURA 3.2: Exemplos de vários tipos de antenas de fio (Figura 1.3 - Balanis 2016)

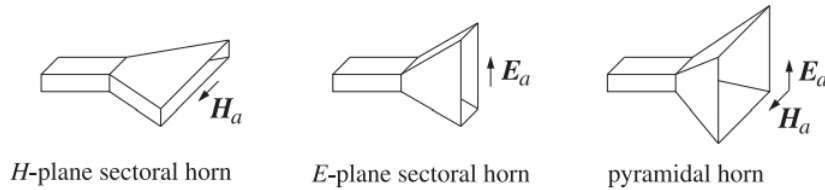


FIGURA 3.3: Antenas de abertura no plano H, E e piramidal

## Antenas de *Microstrip*

Uma antena *microstrip*, conhecida como antena impressa, é um tipo de antena que está inserida numa placa de circuito impresso e funciona como uma antena interna.

Hoje em dia são utilizadas em aplicações comerciais, tendo como as suas maiores vantagens o facto de serem baratas e simples de manufaturar e apresentarem um tamanho reduzido. Este tipo de antenas são aplicadas em frequências Ultra High Frequency (UHF).

A sua construção consiste num *patch* metálico sobre um substrato. Este *patch* pode apresentar as mais variadas formas como representado na Figura 3.4, sendo as retangulares e circulares as mais comuns. Têm ainda as vantagens de serem impressas em superfícies com as mais variadas formas, sendo robustas e versáteis nos parâmetros da sua frequência de ressonância, polarização e impedância (Balanis

2016).

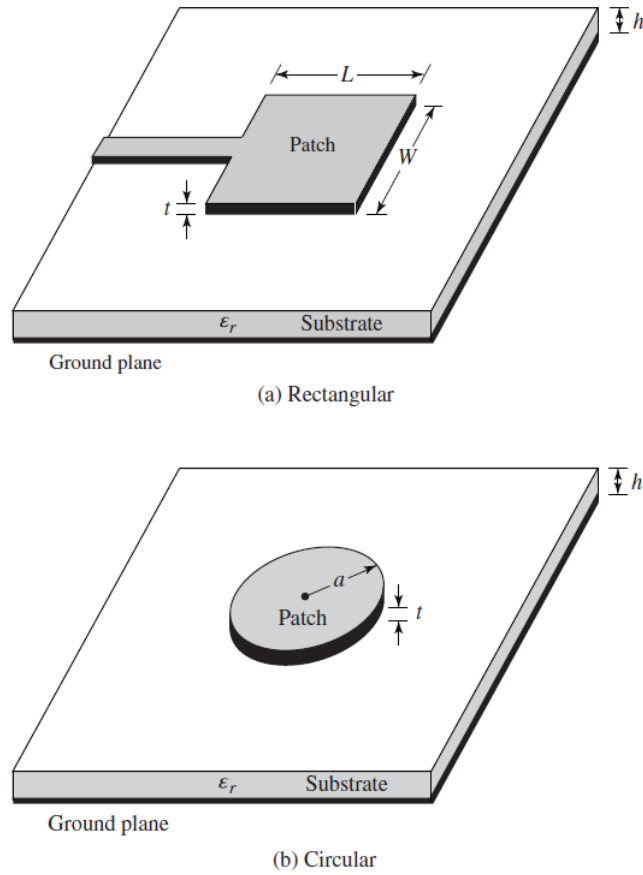


FIGURA 3.4: Exemplos de duas configurações de *patches* diferentes (Figura 1.5 - Balanis 2016)

## Antenas de Matrizes

As antenas de matrizes surgem nas aplicações em que é necessário mais que um elemento. Consegue-se assim agrupar vários elementos de forma a obter as características pretendidas. Algumas alterações às características que se conseguem com este tipo de antenas são o aumento de ganho, alterar o diagrama de radiação, determinar a direção de chegada de um sinal ou maximizar o Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>SINR é um indicador de qualidade de transmissão ajustado a comunicações móveis devido à interferência de outros utilizadores ser mais significativa (Jeske e Sampath 2004).

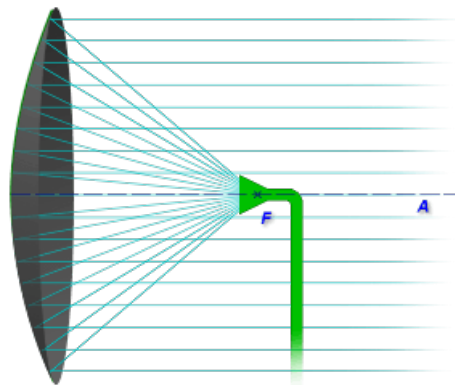
## Antenas de Lente

Este tipo de antenas utiliza as propriedades de convergência e divergência das lentes para a recepção ou transmissão de sinal. O tamanho da lente a ser utilizada depende da frequência - quanto maior for a frequência, menor a lente. Dito isto, é mais favorável usar este tipo de antenas em frequências mais altas, visto que a lente será menor. As suas aplicações são semelhantes às das refletoras parabólicas, especificamente quando usadas em frequências mais altas e que necessitem de mais largura de banda.

## Antenas Refletoras

As antenas refletoras existem desde o final do século XIX, no entanto começaram a ser aplicadas em radares na Segunda Guerra Mundial e a partir do final do século XX em comunicações espaciais. Estas aplicações devem-se à sua capacidade de transmissões a grandes distâncias. Podem-se apresentar nas mais diversas formas, como plano refletor, refletor curvilíneo, entre outros.

O seu modo de funcionamento baseia-se na convergência da energia numa direção como demonstrado na Figura 3.5, o que leva, para além de um grande alcance, a uma grande diretividade.



---

FIGURA 3.5: Funcionamento de uma Antena Refletora

### 3.1.2 Parâmetros Fundamentais

Neste subcapítulo vão ser discutidos os parâmetros mais relevantes que estão relacionados com o funcionamento de uma antena e com a sua *performance*. Grande parte dos parâmetros estão definidos no IEEE 1983 Standard Definitions for Antennas and Propagation.

## Diagrama de Radiação

Um diagrama de radiação é a função ou representação gráfica que descreve as propriedades espaciais de radiação de uma antena. É de extrema importância conhecer este padrão de radiação de uma antena e poder controlá-lo, visto que a distribuição de energia eletromagnética, se for mal dimensionada, pode comprometer o projeto.

A manipulação do diagrama de radiação de uma antena é dependente do objetivo da mesma. Podemos ter como finalidade um diagrama de radiação que seja direcional (Figura 3.6), como numa ligação ponto a ponto, ou podemos como finalidade, um diagrama de radiação omnidirecional (Figura 3.7), ou seja, que radia, idealmente, com igual intensidade para todas as direções.

Para este efeito são utilizadas coordenadas esféricas ( $r$ ,  $\varphi$  e  $\theta$ ), sendo que a antena se encontra na origem do referencial. A propriedade mais relevante nos diagramas de radiação é a distribuição espacial, em duas ou três dimensões, da energia radiada em função da posição do observador de acordo com um azimuth ( $\theta$  constante).

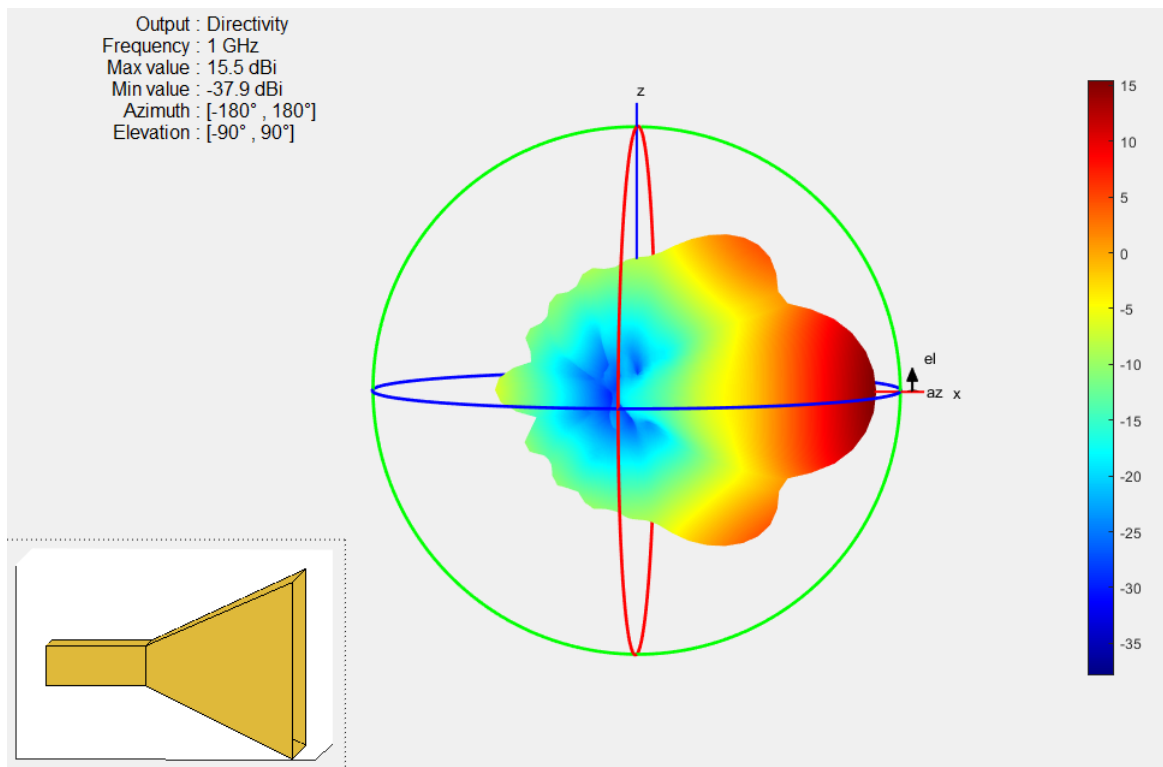
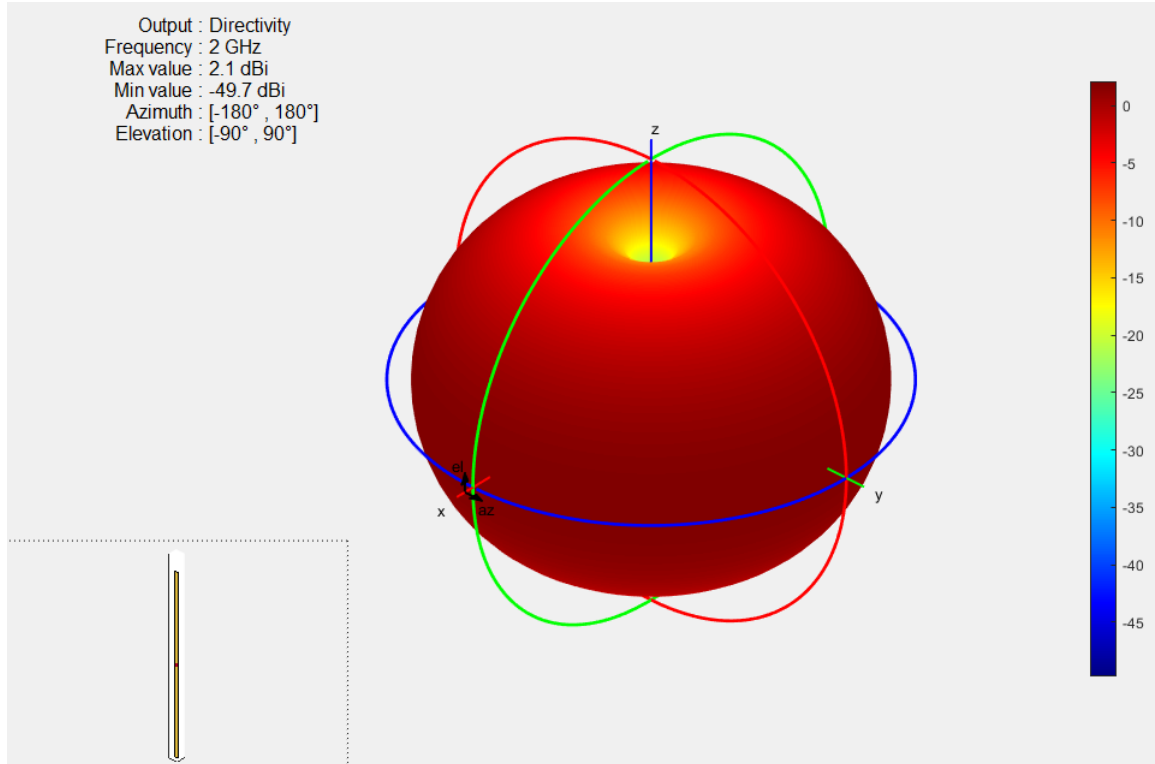


FIGURA 3.6: Diagrama de radiação direcional - Corneta de guia de ondas dimensionada para 1GHz (MATLAB Antenna Designer Tool-kit)






---

FIGURA 3.7: Diagrama de radiação omnidirecional - Dipolo dimensionado para 2GHz (MATLAB Antenna Designer Toolkit)

Os lóbulos são um dos parâmetros fundamentais de um diagrama de radiação, que representam a energia radiada numa direção relativamente ao transmissor e podem ser classificados em lóbulos principais, secundários, laterais e posteriores (Figura 3.8). O lóbulo principal é o lóbulo que contém a direção da radiação máxima, que no caso da Figura 3.8, está definido no sentido do eixo dos  $zz$ . Os lóbulos secundários são todos os lóbulos excepto o principal. Os lóbulos laterais são todos os que radiam energia para qualquer direção que não seja a pretendida. Os lóbulos posteriores contêm a energia que é radiada num ângulo de  $180^\circ$  em relação à direção do feixe da antena.

A largura de feixe a meia potência (Half Power Beamwidth (HPBW)) e a largura de feixe ao primeiro nulo (First Null Beamwidth (FNBW)) estão relacionadas com a capacidade de resolução da antena, ou seja, a sua capacidade de distinguir dois alvos. O critério para distinguir dois alvos é que a HPBW seja aproximadamente  $FNBW/2$ , isto é, se dois alvos estiverem separadas por distâncias angulares iguais ou superiores a  $HPBW \approx FNBW/2$  de uma antena, esta consegue distingui-los (Kraus 1988). Os fatores que afetam a largura de feixe são o comprimento de onda ( $\lambda$ ), a forma do diagrama de radiação e as dimensões da antena.

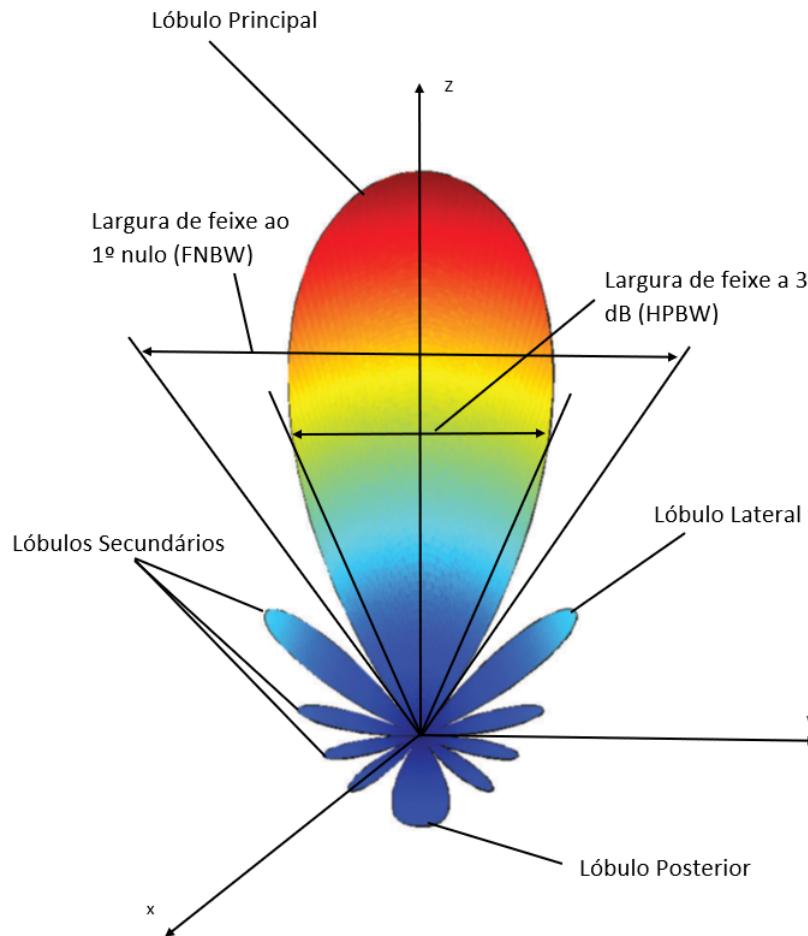


FIGURA 3.8: Elementos caraterísticos do diagrama de radiação

Os diagramas de radiação podem ser classificados quanto à diretividade em que as antenas radiam. Um radiador isotrópico é definido com uma antena hipotética e sem perdas que radia igualmente em todas as direções e é normalmente tomado como referência para exprimir a diretividade de antenas. o radiador direcional é caracterizado por radiar ondas eletromagnéticas em determinadas direções e o radiador omnidirecional radia energia de igual forma em todas as direções (Balanis 2016).

### Planos Principais

Para antenas com polarização linear, discutido com mais detalhe no subcapítulo Polarização, consideram-se os seguintes planos:

- Plano E: Definido pelo plano que contém o vetor do campo elétrico e a direção da máxima radiação;

- Plano H: Definido pelo plano que contém o vetor do campo magnético e a direção da máxima radiação.

Os eixos do sistemas de coordenadas são escolhidos por forma a que pelo menos um dos planos referido coincidas com os planos do referencial, no entanto, há casos em que pode ser mais favorável escolher outro sistema de coordenadas.

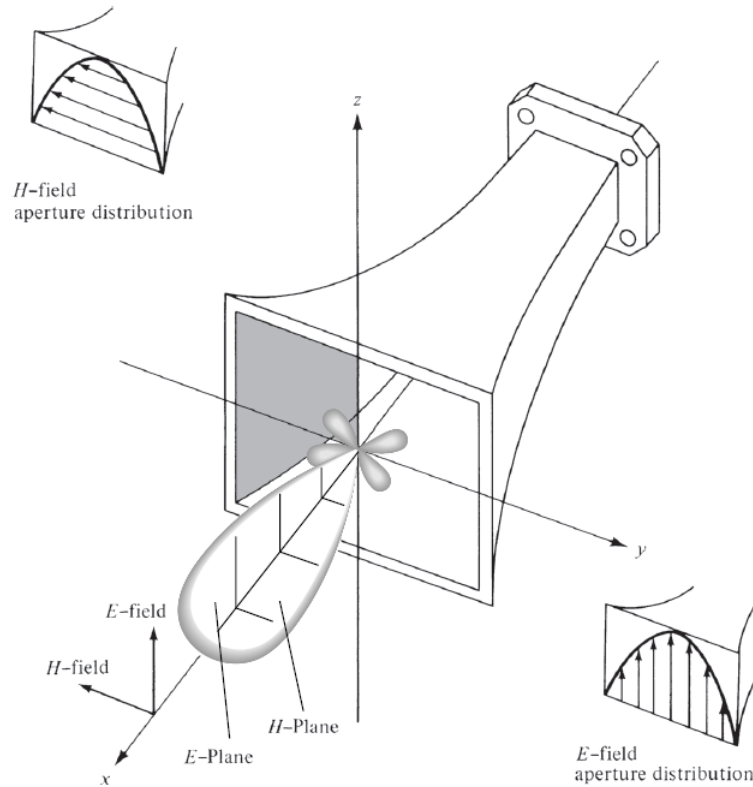


FIGURA 3.9: Campos E e H de um diagrama de radiação de uma antena

### Regiões de Campo

De forma a identificar a estrutura do espaço circundante da antena, este é dividido em três regiões (Kraus 1988):

- Região reativa do campo próximo: Definida com a porção do espaço imediatamente em redor da antena, onde predomina o campo reativo;
- Região do campo próximo (*Região de Fresnel*): Definida como a região da antena entre a região reativa do campo próximo e a região de *Fraunhofer* onde predomina o campo radiado e a sua orientação espacial depende da distância à antena;

- Região do campo distante (*Região de Fraunhofer*): Caracterizada pela região onde a distribuição angular do campo é maioritariamente independente da distância à antena.

Tipicamente, a forma diagrama de radiação é alterado consoante as regiões em que se encontra. Segundo a Figura 3.10 presente no artigo Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e Yoccarino 1995, o diagrama é mais disperso e uniforme na região reativa do campo próximo. À medida em que a distância à antena aumenta, e que se entra nas regiões de *Fresnel* e *Fraunhofer* a forma do diagrama evidencia mais os seus lóbulos e fica mais regular. A separação entre as regiões reativa do campo próximo e região de *Fresnel* e entre a região de *Fresnel* e região de *Fraunhofer* são definidas pelas expressões 3.1 e 3.2 respetivamente (Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e Yoccarino 1995).

$$R = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$R = 0.62\sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} \quad (3.2)$$

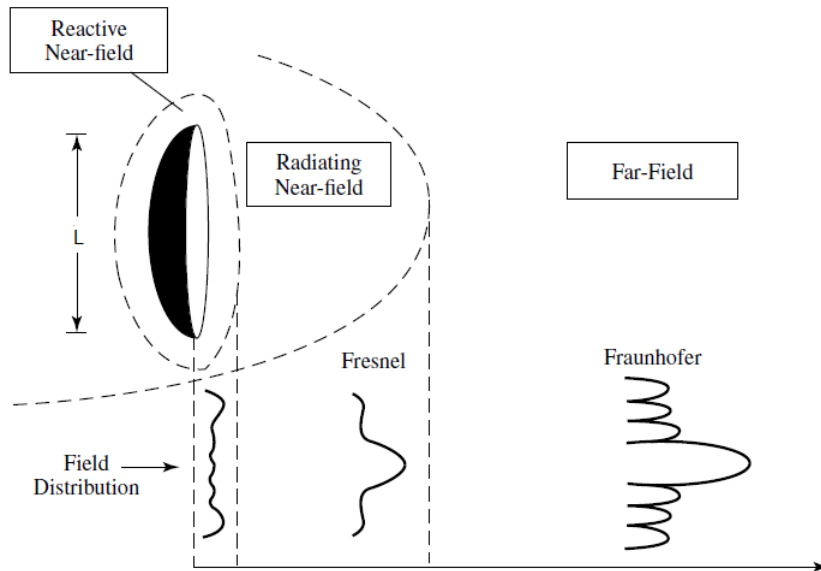


FIGURA 3.10: Alterações típicas do diagrama de radiação desde a região reativa do campo próximo à *Região de Fraunhofer*. (Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e Yoccarino 1995)

## Densidade de Potência

As ondas eletromagnéticas resultam da combinação de um campo magnético e de um campo elétrico que se propaga no espaço. A forma de representar a densidade direcional da quantidade de energia transferida de uma onda eletromagnética é através do vetor de *Poynting*, o qual é definido, contabilizando variações temporais sinusoidais, na equação 3.3, expressa em  $\text{W m}^{-2}$ .

$$W_{av}(x, y, z) = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \quad (3.3)$$

Sendo que o vetor de *Poynting* é uma densidade de potência, ao integrar a componente normal do mesmo, obtém-se na equação 3.4 a potência média radiada pela antena  $P_{rad}$  que atravessa uma superfície fechada  $S$ .

$$P_{rad} = P_{av} = \oint\!\!\!\oint_S W_{rad} \cdot ds = \frac{1}{2} \oint\!\!\!\oint_S \text{Re}[E \times H^*] \cdot ds \quad (3.4)$$

Como meio de comparação, define-se a potência radiada por um radiador isotrópico na expressão 3.6, com uma densidade de potência dada por,

$$W_0 = \hat{a}_r = \hat{a}_r \left( \frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \right) \quad (3.5)$$

$$P_{rad} = \oint\!\!\!\oint_S W_{rad} \cdot ds = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\hat{a}_r W_0(r)] \cdot [\hat{a}_r r^2 \sin\theta d\theta d\phi] = 4\pi r^2 W_0 \quad (3.6)$$

## Diretividade

A diretividade de uma antena é definida com a relação entre a intensidade de radiação numa determinada direção e a intensidade de radiação média em todas as direções. A intensidade média é igual ao quociente entre a potência total radiada pela antena e  $4\pi$  (IEEE 1997). Sendo que a intensidade de radiação  $U$  é obtida pela multiplicação entre a densidade de radiação e o quadrado da distância, a diretividade  $D$  de uma antena pode ser descrita pela expressão 3.7.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.7)$$

Ganho

Largura de Banda

Polarização

Impedância de Entrada

Eficiência

Eficiência da Antena

Máxima Diretividade e Máxima Área Efetiva

Equação de Friis e Equação Radar

*Radar Cross Section*

Temperatura da Antena

Síntese

## 3.2 Simulação de uma Antena

### 3.2.1 Para Sinais DVB-T

# Capítulo 4

## Processamento de Sinal

### 4.1 Processamento de Sinais e Supressão de Clutter

### 4.2 Simulação

#### 4.2.1 Sinais DVB-T

### 4.3 Bases de Dados

#### 4.3.1 Formação de Imagem





# Capítulo 5

## Aplicação

### 5.1 Sistema Desenvolvido

### 5.2 Resultados



# Capítulo 6

## Conclusões e Discussão

### 6.1 Sumário

### 6.2 Discussão e Conclusões

### 6.3 Cenários Possíveis - MARINHA



# Conclusão

A conclusão segue-se ao corpo principal dos capítulos que constituem o trabalho, realçando, de forma resumida e nos aspetos mais relevantes, os passos seguidos e os resultados obtidos (mas evitando fazer um resumo que repita aspetos do corpo). Devem expor-se as dificuldades e limitações sentidas, sobretudo se as mesmas limitaram a investigação e prejudicaram o alcançar dos resultados propostos na introdução.

E, de igual modo, se a investigação desenvolvida mostrou novas vias de trabalho que não puderam ser desenvolvidas, devem evidenciar-se os caminhos que foram abertos, avançando com sugestões e propostas para trabalhos futuros que deem continuidade ao projeto presente.



# Bibliografia

- Balanis, Constantine (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th. New Jersey: John Wiley & Sons, pp. 1–1072. ISBN: 9789896540821. DOI: 10.2307/j.ctvfxvc64.18.
- Griffiths, Hugh e Christopher J. Baker (2017). *An introduction to passive radar*. IEEE (1997). *The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms*. 6th. New York.
- Jeske, Daniel R. e Ashwin Sampath (2004). «Signal-to-interference-plus-noise ratio estimation for wireless communication systems: Methods and analysis». Em: *Naval Research Logistics* 51.5, pp. 720–740. ISSN: 0894069X. DOI: 10.1002/nav.20022.
- Kraus, John D- (1988). *Antennas*. Ed. por McGraw-Hill. 2nd. New Delhi.
- Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e R. G. Yoccarino (1995). «The UCLA Bi-polar Planar-Near-Field Antenna Measurement and Diagnostics Range». Em: *IEEE Antennas & Propagation Magazine, Vol. 37, No. 6*.





# Apêndice A

## Escreve o título do apêndice

As dissertações e outros trabalhos científicos podem conter apêndices ou anexos onde são expostos documentos ou outros materiais que tenham sido usados durante o trabalho, sendo imprescindível que se juntem a ele, mas que, pelo volume, não devem ser introduzidos com o texto por perturbarem a sua harmonia e lógica. São, desta forma, colocados enquanto elemento pós-textual, logo a seguir aos glossários (se existirem) ou à bibliografia. Importa, contudo, compreender o que os distingue um do outro.

Os Apêndices englobam materiais elaborados pelo autor, como conjuntos de gráficos, quadros ou tabelas de dados, eventualmente, traduções de textos, organogramas ou esquemas julgados necessários e referenciados no próprio texto.



# Anexo I

## Escreve o título do anexo

Os Anexos são conjuntos de documentos não elaborados pelo autor do trabalho, mas que serviram para a sua elaboração e facilitam a sua compreensão. Podem ser, igualmente, tabelas, quadros, gráficos ou organogramas retirados de outros autores e obras, mas também textos diversos ou imagens.