

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

HEITOR JOSÉ GONÇALVES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM RADAR METEOROLÓGICO  
COM ANTENAS FIXAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO  
2016

HEITOR JOSÉ GONÇALVES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM RADAR METEOROLÓGICO  
COM ANTENAS FIXAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 - TCC2, do curso superior de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. M.Sc. André Luiz Régis Monteiro

Coorientador: Prof. M.Sc. Reginaldo Nunes de Souza

CAMPO MOURÃO  
2016

---

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
**DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO**  
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM RADAR METEOROLÓGICO COM ANTENAS FIXAS.

por  
Heitor José Gonçalves

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 18 de Novembro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Me. Osmar Tormena Junior  
(UTFPR)

---

Prof. M.Sc. Lucas Ricken Garcia  
(UTFPR)

---

Prof. M.Sc. André Luiz Regis Monteiro  
(UTFPR)  
Orientador

---

Prof. M.Sc. Reginaldo Nunes de Souza  
(UTFPR)  
Coorientador

Dedico este trabalho ao meu pai José Roberto e à minha mãe Sandra, que representam o esteio de minha criação e que com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Dedico ao meu irmão Plínio, que me auxiliou e me encorajou a concluir esta graduação a todo momento desta caminhada.

Ao meu avô José Roberto Gonçalves (*in memoriam*), que me inspirou a ser um homem justo e correto.

Aos meus avós Rubens Maranha, Maria Magdalena e Luzia Aparecida, que também representam o esteio de minha criação e a todo momento estiveram ao meu lado.

À minha amada Maria Laura, que também me orientou e me apoiou durante os momentos tortuosos deste caminho com muito amor e carinho, e é responsável por inúmeros momentos agradáveis em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pois sem ele não teria forças para finalizar esta caminhada.

Agradeço ao Prof.M.Sc. Reginaldo Nunes de Souza, que me acompanhou no início deste trabalho, pelo conhecimento transferido à mim, tanto nos momentos em sala de aula como em minha orientação, e pela sabedoria com que me guiou nesta fase.

Agradeço Prof.M.Sc. André Luiz Régis Monteiro, que através de seu conhecimento e sabedoria foi de suma importância para que este trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço aos meus familiares, pois sempre estiveram do meu lado.

Agradeço aqueles que escolhi como minha segunda família, meus amigos, que me ampararam nos momentos difíceis e comemoram minhas vitórias.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta pesquisa e para minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

GONÇALVES, Heitor José. **Análise de desempenho de um radar meteorológico com antenas fixas**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

Recentemente, foi proposta e analisada na literatura uma configuração inovadora de um sistema de radar meteorológico, com base em duas antenas fixas de feixe largo. Neste sistema está contido um detector que opera sob o critério por razão de verossimilhança (MIRANDA, 2013), que tem como característica a maximização da probabilidade de detecção para uma dada probabilidade de falso alarme. A proposta deste trabalho é analisar o desenvolvimento do projeto deste detector e realizar a análise de desempenho do mesmo. No trabalho é analisado o desenvolvimento matemático para se obter as expressões analíticas na forma fechada das probabilidades de detecção e de falso alarme, além das expressões do número de amostras necessárias para garantir uma certa probabilidade de detecção, e da variável e regra de decisão em função de uma série de amostras recebidas. E por fim é apresentada uma análise de desempenho do detector através de diferentes valores do coeficiente de correlação, e valores de limiar de detecção para variados valores de probabilidade de detecção e de falso alarme.

**Palavras-chaves:** radar meteorológico, detector ótimo, teste por razão de verossimilhança.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Heitor José. **Análise de desempenho de um radar meteorológico com antenas fixas**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

Recently, it was proposed and analyzed in the literature an innovative configuration of a weather radar system, based on two fixed antennas wide beam. In this system it is contained in a detector which operates under the criterion of likelihood ratio (MIRANDA, 2013), which is characterized by maximizing a probability of detection for a given probability of false alarm. The purpose of this paper is to analyze the project development of this detector and perform the same performance analysis. In the work is analyzed the mathematical development to obtain analytical expressions in the closed form of the probabilities of detection and false alarm, in addition to the keywords of the number of samples necessary to ensure a certain probability of detection, and the variable and function decision rule a series of received samples. Finally it is shown an analysis of detector performance using different values of the correlation coefficient, and detection threshold values for different values of probability of detection and false alarm.

**Keywords:** weather radar, great detector, test for likelihood ratio.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Diagrama de blocos de um radar.....	15
Figura 2	– Exemplo do sinal de transmissão de um radar monoestático.....	16
Figura 3	– Misturador.....	17
Figura 4	– Filtro Casado.....	20
Figura 5	– Radar Girante de Feixe Estreito.....	22
Figura 6	– Radar Proposto.....	23
Figura 7	– Critério de <i>Neyman-Pearson</i> .....	28
Figura 8	– Sinal recebido e processo de detecção.....	30
Figura 9	– Vista superior do sistema de radar composto por duas antenas.....	31
Figura 10	– Vista superior do sistema de radar composto por duas antenas.....	32
Figura 11	– Desempenho para $p_d = 0.98$ e $\sigma = 1$ .....	37
Figura 12	– Desempenho para $p_{fa} = 0.0001$ e $\sigma = 1$ .....	38
Figura 13	– $p_{fa}$ e $\gamma$ .....	38
Figura 14	– $p_d$ e $\gamma$ .....	39
Figura 15	– Comparação $p_d$ , $p_{fa}$ pela variável de Decisão.....	40
Figura 16	– Comparação $p_d$ , com $\rho \neq K$ .....	41

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IEEE Institute of Electric and Electronic Engineers

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	TEMA	11
1.1.1	Delimitação do Tema	11
1.2	PROBLEMA	12
1.3	JUSTIFICATIVA	12
1.4	OBJETIVOS	13
1.4.1	Objetivo Geral	13
1.4.2	Objetivos Específicos	13
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
3.1	PULSO DE TRANSMISSÃO	15
3.2	CONVERSÃO DIGITAL-ANALÓGICA E ANALÓGICO-DIGITAL	16
3.3	MODULAÇÃO DEMODULAÇÃO E FILTRAGEM	17
3.4	AMPLIFICAÇÃO	17
3.5	ANTENAS	18
3.6	CANAL	18
3.7	ALVOS DETERMINÍSTICOS	18
3.8	ALVOS DISTRIBUÍDOS	19
3.9	VELOCIDADE DOPPLER	19
3.10	COMPRESSÃO EM ALCANCE E DETECÇÃO	20
3.11	RADARES E SUA APLICAÇÃO NA METEOROLOGIA	20
3.12	RADAR DE FEIXE GIRANTE ESTREITO	21
3.13	MODELO DO RADAR	22
3.14	PROBABILIDADE	23
3.15	LEI DA VEROSSIMILHANÇA	25
3.15.1	Máxima Verossimilhança	26
3.15.2	Crítério de <i>Neyman-Pearson</i>	26
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
4.1	MATERIAIS	29
4.2	MÉTODOS	29
4.2.1	Parâmetros de Desempenho do Radar	29
4.2.1.1	Modelagem Estocástica do Sistema	31
4.2.2	Detector para $\rho = K \neq 0$ Conhecido	33
4.2.2.1	Formulação do Teste de Hipóteses	33
4.2.2.2	Definição do Critério de Decisão	34
4.2.2.3	Determinação da Variável de Decisão	35
4.2.3	Análise e Desempenho do Detector	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>37</b>
5.1	RESULTADOS NUMÉRICOS	37
5.1.1	Resultados Numéricos para $\rho = K \neq 0$	37
5.1.2	Resultados Numéricos para $\rho \neq K$	39
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b>	<b>42</b>
6.1	CONCLUSÕES	42
6.2	PERSPECTIVAS	44
	<b>APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÕES REALIZADAS</b>	<b>46</b>
A.1	IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.22	46

A.2	IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.23 .....	46
A.3	IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.24 .....	46
A.4	IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.25 .....	46
A.5	IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 5.5 .....	47
A.6	IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.1 .....	47
A.7	IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.2 .....	48
A.8	IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.3 .....	48
A.9	IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.4 .....	49
A.10	IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.5 .....	49
A.11	IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.6 .....	49

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

Estudo de um detector de radar meteorológico baseado no critério de verossimilhança por *Neyman-Pearson* (MIRANDA, 2013), método probabilístico usado neste trabalho para obter a razão entre a probabilidade de detecção ( $pd$ ) e probabilidade de falso alarme ( $pfa$ ), aplicado em um sistema de radar do tipo multiestático coerente e pulsado.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Para Skolnik (2008) o radar pode ser considerado como um dispositivo que é capaz de detectar e localizar objetos, usualmente chamados de alvos, através de ondas eletromagnéticas. A sua operação pode ser descrita de forma resumida pelos seguintes itens:

- O radar produz uma energia em forma de ondas eletromagnéticas e as transmite no espaço através de uma antena.
- Parte da energia irradiada pelo radar é interceptada por um objeto, o alvo.
- As ondas interceptadas pelo alvo são refletidas em várias direções.
- Parte destas ondas refletidas retornam para o receptor do radar através da antena.
- Após o tratamento do sinal, é possível obter as informações necessárias para que o dispositivo classifique se existe, ou não, a presença de alvo, e a localização e a natureza do mesmo.

Usualmente radares são utilizados na área militar para detecção de aeronaves, navios, ou mísseis, e também são amplamente usados na área civil para a localização e detecção de pessoas, pássaros, insetos, chuvas, vegetações, estradas, rios, construções, montanhas, meteoros, aeronaves espaciais e planetas (MEISCHNER, 2004).

Através da localização dos alvos, que é constituída pelas distâncias radial, azimutal e de elevação, também é possível, a partir da taxa de variação de sua posição e pela taxa de variação do sinal recebido pelo receptor (efeito Doppler), determinar a velocidade relativa do alvo. Assim, por meio dessas duas informações, é possível prever a futura localização do alvo. Ademais, um radar projetado corretamente, também é capaz de determinar o tamanho, tipo e classe dos alvos (SKOLNIK, 2008).

Para o desenvolvimento do sistema de um simples radar, em essencial leva-se em consideração os seguintes parâmetros: tipos de formas de onda a serem transmitidas, características dos dispositivos de rádio frequência, os tipos de antenas de transmissão e recepção, o tipo do detector e a interface homem e máquina do dispositivo.

Os tipos de formas de ondas se diferenciam através de sua continuidade, quando a onda de transmissão apresentar certa descontinuidade a forma de onda é denominada pulsado, quando não, é denominada contínua. Em relação as antenas um radar pode se diferenciar em relação a sua diretividade, largura do feixe, se ela é estática ou dinâmica, entre outros fatores que irão depender da aplicação do radar. O detector usualmente é caracterizado pelo método probabilístico implementado, afim de identificar e caracterizar o alvo. A interface homem máquina geralmente é composta por dispositivos capazes de fornecer o resultado do detector de uma forma visual.

Um radar pode se diferenciar de outro através de vários conceitos. Quando se observa característica da fase relativa ao pulso transmitido, pode ser classificado como coerente, caso exista o conhecimento desta característica, ou não coerente, caso contrário. Em relação à configuração das antenas, um radar pode ser classificado como monoestático, biestático ou multiestático. É considerado monoestático quando a transmissão e recepção do sinal é realizado através de uma única antena ou duas antenas dispostas lado a lado. Os radares biestáticos são definidos quando o sinal é transmitido e recebido por diferentes antenas. Já o radar multiestático é uma generalização deste último caso, e existe quando há duas ou mais antenas separadas entre si por uma determinada distância (SKOLNIK, 2008).

## 1.2 PROBLEMA

Nas últimas décadas a ocorrência de eventos de fenômenos climáticos intensos tem se intensificado ao redor do globo terrestre, em consequência destes eventos intensificou-se a busca pelo entendimento e observação destes fenômenos. Surgiu então, a necessidade de buscar a máxima qualidade, na precisão e processamento das medidas de previsão e identificação de fenômenos climáticos, que podem incluir desde intensas tempestades a leves precipitações.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando as últimas décadas da história contemporânea, observa-se uma intensificação de eventos climáticos no cenário atmosférico, podendo prejudicar significativamente a região onde ele ocorre, com importantes resultados em termos de perdas humanas e danos materiais. Sendo que os danos materiais podem proporcionar graves crises sociais e econômicas em regiões e até em países menos preparados em resposta a estes desastres (MACEDO, 2008).

Torna-se então de extrema importância o aprimoramento dos sistemas de predição, que

são realizados através de observações de fenômenos atmosféricos e pelo conhecimento adquirido ao longo dos últimos anos. Tais sistemas de predição podem ser utilizados em diversos setores de nossa sociedade como na prevenção de desastres naturais, em benefício do controle de tráfego aéreo, nos estudos de fenômenos macro, como o aquecimento global, entre outros.

Neste contexto se destacam os radares meteorológicos que constituem as observações realizadas do solo para atmosfera, destacando-se principalmente no aperfeiçoamento dos modelos de curto prazo. Onde, a partir de observações a curtas distâncias (100 km a 400 km), é possível determinar o desenvolvimento de fenômenos meteorológicos nos próximos momentos, levando em consideração eventos anteriores.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Estudo de um radar meteorológico com detector baseado no critério de verossimilhança por *Neyman-Pearson* (MIRANDA, 2013), aplicado em um sistema de radar do tipo multiestático coerente e pulsado, que viabiliza o uso de antenas fixa e conseqüentemente seu custo em relação aos radares convencionais (GARCÍA *et al.*, 2016).

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho se resumem na análise da qualidade e eficiência de operação de um detector de radar projetado segundo o critério de *Neyman-Pearson*, que é definido pelo uso da razão de verossimilhança dos sinais recebidos pelas antenas (MIRANDA, 2013).

Os objetivos específicos são definidos por:

- Estudo do projeto do detector;
  - Elaboração de hipóteses para este detector;
  - Determinação da variável de decisão;
  - Determinação da regra de decisão;
  - Caracterização da variável de decisão;
- Análise e desempenho do detector;

## 2 METODOLOGIA

O método do detector meteorológico deste trabalho será estudado através de simulações do software MATLAB®.

Em uma primeira etapa do projeto será estudado o desenvolvimento da modelagem estocástica do sistema de uma determinada partícula, que apresenta uma contribuição  $l$ -ésima para o sistema, que é localizada em uma célula de resolução de alcance do radar.

Na segunda etapa será realizado o projeto de um detector baseando no critério de *Neyman-Pearson* para  $\rho = K \neq 0$ , em que  $\rho$  representa o coeficiente de correlação entre os sinais das antenas e  $K$  representa o valor da hipótese do coeficiente de correlação, com os modelos do sinais estocásticos determinados previamente. Será considerado o parâmetro de critério  $H_0$  ( $\rho = 0$ ) como sendo a não ocorrência do alvo, e o parâmetro  $H_1$  para o caso contrário.

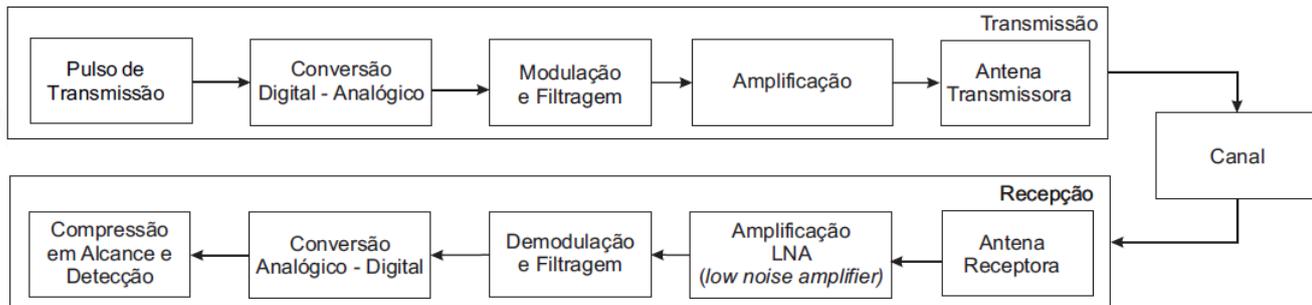
Na terceira etapa, através do conceito de razão de verossimilhança e pelos parâmetros de *Neyman-Pearson*, será definida a equação de variável de decisão, onde será definida a regra de decisão do detector.

Em uma penúltima etapa, com as equações obtidas anteriormente, serão caracterizadas as equações de desempenho do detector. A partir destas equações será possível determinar a equação do limiar de decisão do detector e o número de amostras necessárias para garantir a probabilidade de detecção e de falso alarme desejado.

Na última etapa serão feitas simulações com base na variação de amostras e na variação do coeficiente  $\rho$ .

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A operação de um radar é ilustrada no diagrama de blocos da Figura 1. Esta figura mostra os blocos básicos necessários para o funcionamento de um radar.



**Figura 1 – Diagrama de blocos de um radar.**

Fonte: Adaptado Miranda (2013)

As próximas Seções deste capítulo são destinadas à apresentação dos principais conceitos relacionados ao radar, consistindo basicamente em mostrar qual a função de cada bloco da Figura 1.

#### 3.1 PULSO DE TRANSMISSÃO

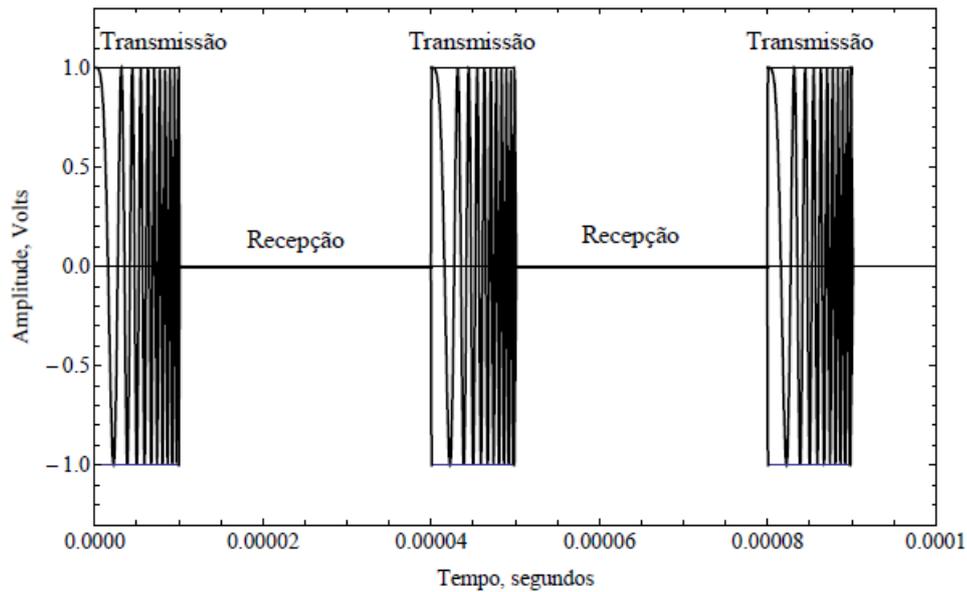
Como se pode observar na Figura 1 a primeira etapa realizada pelo radar é a criação de um pulso de transmissão ainda na forma digital.

Em relação ao pulso de transmissão os radares podem ser classificados como de onda contínua ou pulsados. O radar de onda contínua se apresenta no tipo de radar biestático e sua característica é a emissão da onda de transmissão a todo momento. Já os radares pulsados se apresentam no tipo monoestático, os quais transmitem sinal a cada determinado intervalo de tempo como visto na Figura 2. Neste último tipo de radar usa-se um multiplexador que seleciona a operação de acordo com o evento do pulso transmitido: modo de recepção quando a antena de transmissão está inativa, e modo transmissão quando a antena transmissora é ativada (SKOLNIK, 2008)

Os sinais transmitidos por pulsos podem ser do tipo senóide, sendo que cada um destes sinais possui uma característica própria, podendo variar de acordo com sua aplicação.

O radar que compõe o detector deste trabalho é do tipo pulsado, transmite um pulso linearmente modulado em frequência, com uma determinada banda  $\Delta f$  que pode ser representada em banda base como:

$$S_p(t) = A(t)e^{jK_f\pi t^2} \quad (3.1)$$



**Figura 2 – Exemplo do sinal de transmissão de um radar monoestático.**

Fonte: Miranda (2013)

Sendo  $K_f = \Delta f / \tau_p$  a taxa de variação da frequência do pulso e  $A(t)$  a amplitude da amplificação. Onde  $\Delta f$  é a largura de banda do sinal e  $\tau_p$  o comprimento do pulso.

Observa-se que quando o radar opera como transmissor ele não é capaz de detectar nenhum tipo de alvo, esta situação é caracterizada como zona cega, onde o radar não é capaz de perceber alvo a uma distância de (GARCÍA *et al.*, 2016):

$$\Delta s = \frac{c\tau_p}{4} \quad (3.2)$$

Em que  $c$  é a velocidade da luz.

### 3.2 CONVERSÃO DIGITAL-ANALÓGICA E ANALÓGICO-DIGITAL

Em Oppenheim e Schaffer (2010) a conversão digital-analógica é definida através de um número finito de bits para uma representação física de tensão ou corrente elétrica. Por outro lado, a conversão analógica-digital é realizada pela obtenção de valores de um sinal elétrico contínuo em intervalos de tempos regulares, que corresponde a uma determinada frequência de amostragem  $f_s$ . Tem-se como resultado deste método uma sequência de  $k$  números reais, que pode ser expressa como:

$$S[k] = S\left(k \frac{1}{f_s}\right) \quad (3.3)$$

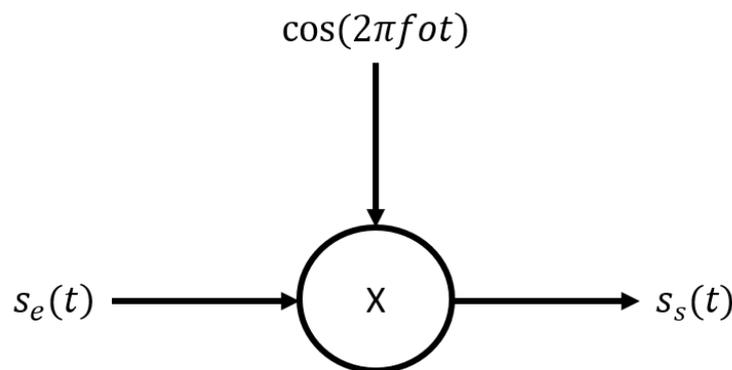
Sendo  $k$  um número inteiro.

### 3.3 MODULAÇÃO DEMODULAÇÃO E FILTRAGEM

O sinal em banda base é modulado afim de obter algumas características inerentes do sistema, tais como a frequência de alocação no espectro e dimensionamento das antenas (LATHI; DING, 2012). Esta modulação é realizada por um misturador, ilustrado na Figura 3

A modulação do sinal usualmente é realizada por misturadores através da modulação em amplitude. Um sinal  $S_e(t)$  é multiplicado por sinal senoidal com frequência de referência  $f_0$ , conhecida como frequência de portadora, resultando em um sinal  $S_s(t)$ . Este sinal é então adequadamente transmitido (LATHI; DING, 2012).

A demodulação do sinal se apresenta de uma forma mais complexa, pois o sinal é demodulado em várias etapas afim de alcançar a frequência da portadora previamente contida no sinal antes de se adicionar distorções causadas pelo meio.



**Figura 3 – Misturador.**

Fonte: Adaptado Miranda (2013)

### 3.4 AMPLIFICAÇÃO

Faz-se necessária a amplificação do sinal, pois para que o radar identifique algum tipo de alvo, o sinal refletido deve ter energia suficiente para ultrapassar o limiar de decisão. O eco, sinal que o sistema recebe após a reflexão do alvo, geralmente é muito fraco, em radares este sinal recebe o tratamento de um amplificador de baixo ruído, *Low-Noise Amplifier (LNA)* (SKOLNIK, 2008).

### 3.5 ANTENAS

A função da antena varia de acordo com tipo de radar, como visto anteriormente. Além das perdas no sinal que podem ocorrer por diversos fatores, o sinal também pode ser influenciado pela diretividade e o ganho da antena, sendo que estes variam de acordo com o padrão de radiação da antena (SKOLNIK, 2008).

### 3.6 CANAL

O canal é definido pelo meio em que o sinal propaga até atingir o alvo. Para a melhor compreensão de propagação do sinal é importante distinguir quais efeitos se manifestam sobre onda eletromagnética através do canal onde ela está inserida.

Tais efeitos podem ser definidos como a atenuação, que é a perda gradual de intensidade do sinal, a dispersão, que é relacionada com o índice de refração do meio, e a difração que é o fenômeno que afeta a propagação da onda no meio (LATHI; DING, 2012).

O estudo da influência do canal é de suma importância, pois ele influencia na amplificação e modulação/demodulação do sinal (SKOLNIK, 2008).

### 3.7 ALVOS DETERMINÍSTICOS

Segundo Shnidman (2005), são considerados alvos determinísticos os que apresentam amplitude e fase bem definidas. Neste caso, a fase depende apenas da velocidade do alvo em relação ao radar, ou vice-versa. Sua reflexão é representada como:

$$Z[k] = A[k]e^{j\Phi[k]} \quad (3.4)$$

em que  $k = 1, 2, \dots, N_a$  representa o número de amostras em diferentes instantes regulares de tempo  $kT$ , intervalos de tempo discreto. Assim, se um determinado alvo apresentar movimento retilíneo uniforme, com velocidade radial igual a  $V$ , onde  $T$  é o intervalo entre as amostras e  $N_a$  é o número de amostras de um sinal, sua fase pode ser expressa por:

$$\Phi[k] = \frac{-4\pi}{\lambda} R[k] = \frac{-4\pi}{\lambda} (R[0] + VkT) \quad (3.5)$$

Alvos que não são de interesse do radar, como por exemplo, prédios e torres, são denominados de *clutter*. Estes tipos de alvos também são considerados determinísticos, e apresentam como características velocidade igual a zero e um valor de fase dominante e constante ao longo do tempo.

### 3.8 ALVOS DISTRIBUÍDOS

De acordo com Shnidman (2005), ao contrário de alvos determinísticos, alvos distribuídos são caracterizados por um conjunto de partículas que ocupam um mesmo volume, e suas características de fase e intensidade se apresentam em uma determinada distribuição estatística. Analisa-se então a contribuição de uma  $l$ -ésima partícula que pode ser representada como:

$$Z_l[k] = A_l[k]e^{j\Phi_l[k]} \quad (3.6)$$

em que  $A_l[k]$  é a amplitude, que depende da seção de reta da partícula e sua localização no volume, e  $\Phi_l$  representa a fase total:

$$\Phi_l[k] = \frac{-4\pi R_l[k]}{\lambda} + \Upsilon_l[k] \quad (3.7)$$

Tendo  $\Upsilon_l[k]$  como característica intrínseca de cada partícula. O sinal recebido em um determinado instante  $k$  é a soma vetorial das ondas refletidas por cada partícula em um determinado volume. E o valor de resolução de cada  $N_p$  partícula é dado por:

$$S[k] = \sum_{l=1}^{N_p} Z_l[k] = \sum_{l=1}^{N_p} A_l[k]e^{j\Phi_l[k]} = A[k]e^{j\Phi[k]} \quad (3.8)$$

Onde  $R_l$  é a distância de uma partícula em relação ao radar e  $A_l$  é a representação de amplitude de uma partícula.

Os parâmetros  $A_l$ ,  $R_l$  e  $\Phi_l$  possuem distribuição aleatória devido ao modo que as partículas se movimentam. Quanto maior o volume onde as partículas se encontram mais espalhada se torna a fase  $\Phi_l$  das partículas.

### 3.9 VELOCIDADE DOPPLER

Quando se quer determinar a velocidade radial de um alvo, são utilizados os radares do tipo Doppler, que são baseados no efeito físico denominado efeito Doppler. Quando um radar transmite um sinal com uma determinada frequência, ele recebe em seu detector um mesmo sinal com uma frequência modificada de acordo com a velocidade. Obtendo a diferença entre as frequências do sinal transmitido e do sinal recebido, determina-se a nova frequência momentânea do alvo, e através desta informação pode se extrair importantes informações sobre ele, como velocidade, posição atual e futura (SKOLNIK, 2008).

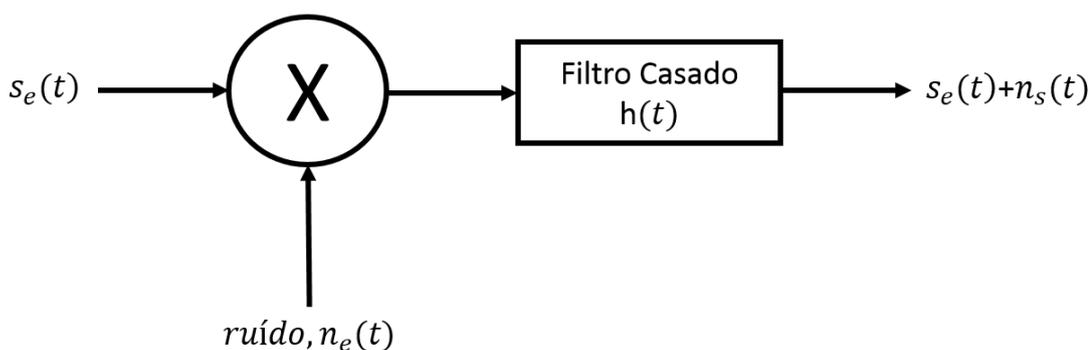
### 3.10 COMPRESSÃO EM ALCANCE E DETECÇÃO

A probabilidade de detecção, que é a probabilidade de um sinal presente no receptor ser declarado como sinal de um alvo, depende da relação sinal-ruído. O objetivo é maximizar esta última relação preservando o sinal.

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos do receptor, sendo que o sinal recebido da reflexão é  $s_e(t)$  e o ruído aditivo gaussiano branco é  $n_e(t)$ . Quando este sinal é submetido a um filtro, de resposta ao impulso  $h(t)$ , tem-se como objetivo maximizar a potência do sinal de saída  $s_s(t)$ , em relação ao sinal do ruído no instante  $t_o$ , que é momento inicial que o alvo reflete o sinal. Tendo como base este evento e tomando o que é descrito em (MIRANDA, 2013) a resposta pelo filtro é dada por:

$$h(t) = S_e^*(t_0 - t) \quad (3.9)$$

Este filtro é denominado de filtro casado. A resposta desse filtro é determinada pelo complexo conjugado do sinal transmitido espelhado em relação ao eixo vertical. Portanto, não é possível trabalhar com seu resultado de forma direta, quando se quer a distância do alvo determina-se a correlação do sinal recebido com a cópia do sinal transmitido. Se o resultado desta correlação exceder um certo limiar, é possível que o sinal recebido seja proveniente de um alvo (CHARTS, 2000). Em radares, quando o produto entre a largura de banda do sinal transmitido e o comprimento do pulso é bem maior que um, diz-se que a operação do filtro casado exerce uma compressão de pulso sobre o sinal.



**Figura 4 – Filtro Casado.**  
Fonte: Adaptado Miranda (2013)

### 3.11 RADARES E SUA APLICAÇÃO NA METEOROLOGIA

A meteorologia (do grego *meteoros*, que significa elevado no ar, e *logos*, que significa estudo) é a ciência que estuda a atmosfera terrestre. Seus aspectos mais tradicionais e conhecidos são a previsão do tempo e a climatologia. Através deste conceito podemos considerar um fenô-

meno meteorológico como um evento que acontece na atmosfera e está relacionado diretamente ao clima, como o processo de condensação, chuva e precipitações (LUTGENS, 1989).

Os radares meteorológicos são capazes de atuar nesse contexto determinando a posição, a refletividade, velocidade e o espalhamento espectral das partículas que constituem determinados eventos na atmosfera.

A refletividade pode ser considerada como a energia retornada devido ao espalhamento gerado pelas partículas atmosféricas como resultado de sua interação com as ondas eletromagnéticas. Porém, nem toda a energia que o radar irradia é refletida por estas partículas, pois parte desta energia é absorvida pelas partículas, e a outra parte nem sequer chega ao encontro das partículas, dispersando-se na atmosfera. A energia refletida pelas partículas, que retorna para o radar é responsável pela caracterização do ambiente que ela foi irradiada, por exemplo, fenômenos climáticos, desde um céu nublado à fortes precipitações (BRINGI; CHANDRASEKAR, 2001).

A velocidade e posição de eventos na atmosfera, pode ser determinada através de uma filtragem apropriada do sinal e pela repetitividade nas medições.

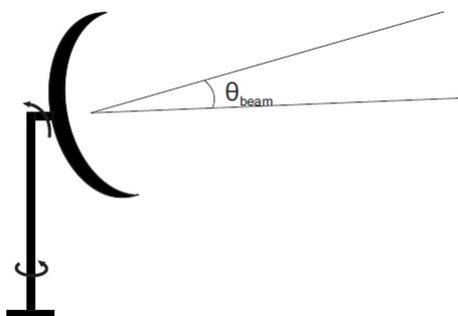
Em radares meteorológicos a reflexão de alvos indesejados são denominado de *clutters* como, o próprio solo, montanhas, prédios, árvores entres outros, estes alvos podem agir de forma bastante efetiva sobre o sinal recebido. Para minimizar o efeito do sinal do *clutter* são aplicadas técnicas de implementação de filtros capazes de anular componentes de baixas frequências, as quais por natureza, se encontram nos sinais recebidos dos *clutters*. Estes filtros são implementados tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo, levando em consideração o conceito de velocidade Doppler, observando que um alvo parado apresenta velocidade Doppler igual zero (SKOLNIK, 2008).

### 3.12 RADAR DE FEIXE GIRANTE ESTREITO

Dentre os tipos de radares existentes na meteorologia usualmente se utiliza radares girantes com antenas de feixe estreito ( $\theta_{beam}$ ) (WADA; HORIKOMI; MIZUTANI, 2009) como na Figura 5. Neste radar a energia é irradiada através de uma antena do tipo corneta com incidência em um grande refletor parabólico que está contido em um feixe, direção da radiação, estreito que varia em torno de 0,5 a 3 graus. A varredura de 360° em azimute é realizada de modo mecânico através de um motor, e a varredura de elevação da antena é realizada através da variação de sua posição angular, em cada volta. Geralmente pela característica de seu feixe estreito e pela sua robustez, uma varredura completa do céu viria em torno de 15 a 20 minutos de acordo com sua configuração (WADA; HORIKOMI; MIZUTANI, 2009).

O tipo de antena citado no último parágrafo apresenta variações de projeto em seus parâmetros de funcionamento, devido a uma estrutura que a envolve com o objetivo de proteger

contra fenômenos externos. A este tipo de estrutura da-se o nome de *rodome*. Esta estrutura é capaz de alterar o feixe da antena, e a consequência disto é a diminuição de ganho e aumento dos lóbulos secundários, influenciando diretamente no desempenho do detector. Logo em radares que contém esta configuração devem ter projetos desenvolvidos levando em consideração as perdas ocasionadas pela presença de *rodome* (WADA; HORIKOMI; MIZUTANI, 2009).



**Figura 5 – Radar Girante de Feixe Estreito.**

Fonte: Adaptado Miranda (2013)

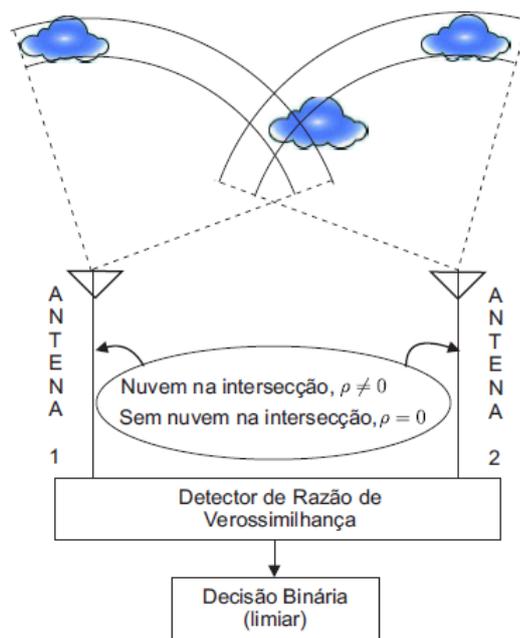
No projeto deste tipo de antena de feixe estreito, a faixa de frequência de operação e a abertura angular determinam os tamanhos da antena. Quanto maior for a antena maior será a demanda mecânica para realizar a varredura no céu em azimute e elevação. Estes fatores influenciam diretamente no custo do projeto, no que compreende a construção do radar e na infra-estrutura de sua instalação (MIRANDA, 2013).

### 3.13 MODELO DO RADAR

Nesta seção é descrito brevemente o modelo de radar proposto por Miranda (2013), o qual é o objeto de estudo deste trabalho. Nele é proposto um detector de radar meteorológico de curtas distâncias, do tipo multiestático coerente e pulsado, o qual faz o uso de antenas fixas e feixe largo, com a detecção e previsão de fenômenos meteorológicos implementadas em software. A operação deste radar se dá em banda X, de 8 a 12,5 GHz. O detector em questão é implementado com base no conceito de razão de verossimilhança e decisão binária (Método de *Neyman-Pearson*) (MIRANDA, 2013).

Como demonstrado na Figura 6, o sinal é recebido e comprimido em alcance através do filtro casado, com o objetivo de melhorar a resolução e aumentar a relação sinal-ruído. No próximo momento são realizados cálculos para a detecção. Nesta etapa, o objetivo é definir uma variável de decisão a partir de um número de amostras dos sinais recebidos e aplicar a decisão binária, a qual é baseada em um limiar pré-determinado.

No detector é realizado um teste de hipóteses, e questiona-se a presença de alvo. Caso haja alvo na região onde há a intersecção do sinal entre as duas antenas, o coeficiente de correlação será  $\rho \neq 0$ . Já para o caso em que não há alvo,  $\rho = 0$ . Este coeficiente de correlação



**Figura 6 – Radar Proposto.**  
 Fonte: Adaptado Miranda (2013)

$\rho$  é definido pela correlação dos sinais recebidos pelas antenas 1 e 2, provenientes da reflexão das partículas. Neste radar proposto, é necessário informar a probabilidade de falso alarme e de detecção de um alvo, através de um coeficiente de correlação mínimo.

### 3.14 PROBABILIDADE

Em Papoulis e Pillai (2002), é apresentada a teoria da probabilidade, que permite a modelagem de situações que apresentam resultados aleatórios quando se trata de experimentos envolvendo espaço amostral, eventos e distribuições probabilísticas. Os fundamentos desta teoria nos permitem o desenvolvimento de diversas ferramentas para calcular probabilidades e médias para um conjunto longo de experimentos. Neste contexto se apresenta a estatística, considerada a ferramenta responsável em relacionar os modelos probabilísticos e o mundo real.

O processo de aplicação dos modelos probabilísticos, se dá pela realização de experimentos e coleta de dados afim de descobrir parâmetros, como médias e variâncias, do processo estocástico, fenômeno que varia em algum grau a medida que o tempo passa. A análise destes parâmetros define a qual distribuição se adapta o conjunto de dados coletados.

Para análises teóricas, é considerado que todas as  $n$  observações do experimento foram realizadas sobre as mesmas condições, e por esta razão define-se a amostragem aleatória  $X_n = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ , tendo o número de variáveis independentes com a mesma distribuição de  $X$ .

Para se realizar o cálculo de uma estatística deve-se estimar o parâmetro  $\psi$  de um con-

junto de resultados com a variável aleatória  $X$ , isso representa a obtenção de conclusões de  $\psi$  baseado nos parâmetros de  $X_n$ . Logo, o cálculo de uma estatística baseada em vetor de variáveis aleatórias  $X_n$  segundo Papoulis e Pillai (2002) pode ser escrito como:

$$\hat{\Psi}(X_n) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.10)$$

Analisando a Equação (3.10) é possível definir que uma estatística é simplesmente uma função que apresenta um conjunto de variáveis aleatórias  $X_n$ , concluindo assim que o parâmetro  $\hat{\Psi}$  é uma variável aleatória. Isto nos diz que estimativas, inferências e conclusões baseadas em estatística devem ser formuladas em termos probabilísticos (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

A distribuição amostral de uma estatística  $\hat{\Psi}$  é representada pela função densidade de probabilidade. Esta distribuição permite o cálculo de parâmetros  $\hat{\Psi}$ , como média e variância, assim como as probabilidades envolvendo este fator. A distribuição amostral, através de seus parâmetros nos permite determinar com certa precisão uma estatística  $\hat{\Psi}$  (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

Em um experimento, os valores de  $n$  observações,  $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ , são utilizados para estimar o parâmetro  $\psi$  como um valor da função  $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . É por este motivo que  $\hat{\Psi}$  é denominado de ponto estimador para o parâmetro  $\psi$ . É possível a existência de diversos estimadores para  $\psi$ , apresentando diferentes características para o tratamento de dados e como eles são processados. Então se faz necessário a caracterização de cada estimador para compará-los e definir o melhor estimador para o parâmetro  $\psi$ .

É considerado o estimador ideal aquele que, na média, se iguala ao valor de  $\psi$ .

$$E[\hat{\Psi}] = \psi \quad (3.11)$$

Para garantir que o cálculo dos estimadores seja realizado com qualidade e eficiência, um primeiro modo é apresentado utilizando o conceito de viés em conjunto com os estimadores produzidos, calculados matematicamente.

O viés é calculado como a esperança, valor esperado, da diferença entre o valor do parâmetro e o valor produzido pelo estimador, representado pela seguinte equação:

$$V[\hat{\Psi}] = E[\hat{\Psi}] - \psi \quad (3.12)$$

Existindo o valor da igualdade entre destas duas últimas equações, diz-se que o estimador é não viesado (não viciado), e viesado (viciado) caso contrário. Outra opção que se tem para classificar a qualidade e eficiência do estimador, é realizar a análise do erro médio quadrático, definido em Papoulis e Pillai (2002), por:

$$E[(\hat{\Psi} - \psi)^2] = Var[\hat{\Psi}] + V[\hat{\Psi}]^2 \quad (3.13)$$

Analisando o conceito apresentado anteriormente, um bom estimador apresenta um erro médio quadrático próximo de zero, conseqüentemente próximo de  $\psi$ . Caso o viés seja

zero, o erro médio quadrático é dado apenas pela variância do estimador (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

Um terceiro modo que meça a qualidade e eficácia do estimador, é na análise do comportamento estimador à medida que o número de amostras aumenta. O estimador  $\hat{\Psi}$  é considerado consistente se  $\psi$  converge para todo  $E > 0$ , pela seguinte equação definida em Papoulis e Pillai (2002):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[|\hat{\Psi} - \psi| > E] = 0 \quad (3.14)$$

Visto isso, são considerados estimadores ideais aqueles onde o viés nulo e o erro médio quadrático é mínimo. Como estamos tratando de inferências estatísticas, não existem garantias que existirá estimadores aceitáveis para todos os parâmetros levantados. Porém existem estimadores que apresentam diferentes características de acordo com o número de amostras, número de coleta de dados entre outras características do espaço amostral estudado. Uma dessas classes de estimadores são os estimadores de máxima verossimilhança, que apresenta algumas propriedades para  $n$  de ordem elevada, podendo ser trabalhados para se obter um viés pequeno e variância mínima (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

### 3.15 LEI DA VEROSSIMILHANÇA

Observando um variável aleatória  $X$  com o comportamento explicado por duas hipóteses ( hipóteses  $A$  e  $B$  ) que se deseja comparar. Foi realizado um estudo e foi extraído o valor  $k$  de  $X$  em uma determinada observação.

Então, questiona-se, o que as hipóteses dizem a respeito desta observação?

- A hipótese  $A$  implica que  $X = k$  seria observado por uma probabilidade  $p_A = (k)$ ;
- A hipótese  $B$  implica que  $X = k$  seria observado por uma probabilidade  $p_B = (k)$ ;

No entanto, no processo de investigação científica o que realmente interessa é a seguinte questão: “O que a observação diz a respeito sobre a hipótese  $A$  e  $B$  ?” A lei de verossimilhança afirma que a observação  $X = k$  é uma evidência que favorece a hipótese  $A$  sobre a hipótese  $B$  se e somente se :

$$p_A(k) > p_B(k) \quad (3.15)$$

Implicando na Razão de Verossimilhança

$$\frac{p_A(k)}{p_B(k)} \quad (3.16)$$

Que mede a força de evidência da hipótese  $A$  sobre a hipótese  $B$ .

### 3.15.1 Máxima Verossimilhança

Considere que uma função  $x_n = (x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$  sejam valores observado de uma amostra aleatória com a variável aleatória  $x$  e  $\psi$  é o parâmetro a ser descoberto. A função de máxima verossimilhança da amostra, em função de  $\psi$  é definida por

$$l(x_n; \psi) = l(x_1, x_2, \dots, x_n; \psi)l(x_n; \psi) = f_x(x_1, x_2, \dots, x_n|\psi) \quad (3.17)$$

em que  $f_x$  é a função densidade de probabilidade conjunta do valores observados e  $X$  é tido como uma variável aleatória contínua. Se as amostras  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são independentes e identicamente distribuídas é possível chegar a uma expressão mais simples para a função de máxima verossimilhança:

$$f_x(x_1, x_2, \dots, x_n|\psi) = f_x(x_1|\psi)f_x(x_2|\psi)\dots f_x(x_n|\psi) = \prod_{j=1}^n f_x(x_j|\psi) \quad (3.18)$$

Por definição este método consiste em selecionar um valor do estimador onde  $\hat{\Psi} = \psi^*$ , e  $\psi^*$  é o valor do parâmetro que maximiza função de máxima verossimilhança, ou seja:

$$ML = (x_1, x_2, \dots, x_n; \psi) = \max_{\psi} l(x_1, x_2, \dots, x_n; \psi) \quad (3.19)$$

em que o máximo é escolhido entre todos os valores possíveis de  $\psi$ .

Para facilitar a manipulação matemática se trabalha com a função logarítmica pois se trabalha com soma ao invés de produto, então:

$$L(x_n|\psi) = \ln l(x_n; \psi)L(x_n|\psi) = \sum_{j=1}^n \ln f_x(x_j|\psi) = \sum_{j=1}^n L(x_j|\psi) \quad (3.20)$$

Observando que a função  $\ln(x)$  é crescente com  $x$ , conclui-se que maximizar a função logarítmica  $ML$  é equivalente a maximizar a função  $ML$ . Para se estimar a máxima verossimilhança faz-se a derivada da função verossimilhança em relação a  $\psi$  igualando a zero, então:

$$\frac{\partial}{\partial \psi} L(x_n|\psi) = \frac{\partial}{\partial \psi} \ln l(x_n|\psi) = 0 \quad (3.21)$$

Solucionando o problema acima é possível encontrar o valor do parâmetro  $\psi^*$  estimado pelo método da verossimilhança.

### 3.15.2 Critério de Neyman-Pearson

Um teste apresenta as hipótese  $H_0$  e  $H_1$ . Utilizando o critério de Neyman Pearson é possível maximizar a probabilidade de detecção ( $pd$ ) para uma dada probabilidade de falso alarme

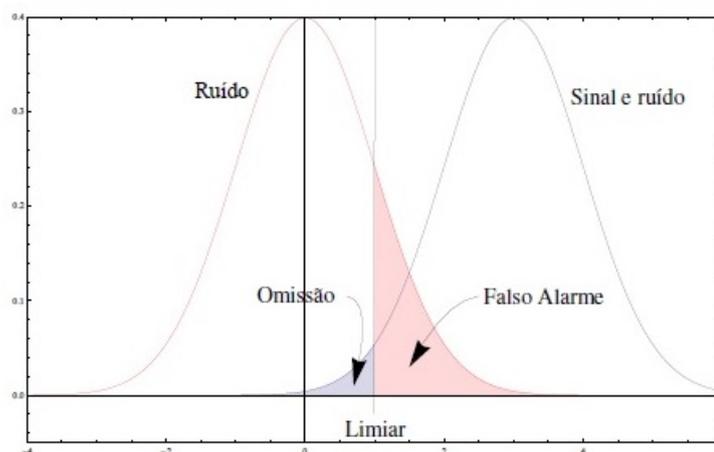
( $pfa$ ), decidindo pela hipótese  $H_1$  se

$$\Lambda(\underline{s}) \triangleq \frac{f(\underline{s}|H_1)}{f(\underline{s}|H_0)} > \gamma \quad (3.22)$$

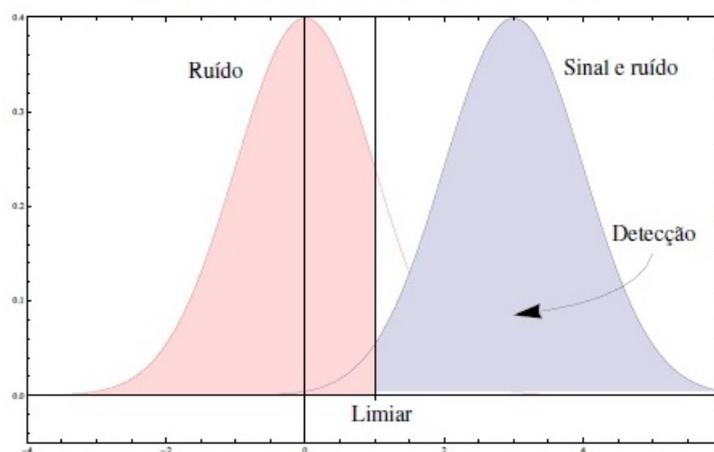
Onde  $\underline{s}$  é o vetor de amostras observado,  $\Lambda(\underline{s})$  é a razão de verossimilhança de  $\underline{s}$ ,  $f(\cdot)$  é a função densidade de probabilidade (FDP), em cada uma das hipóteses e  $\gamma$  é o limiar de decisão, que é determinado por:

$$pfa = \int_{\{\underline{s}:\Lambda(\underline{s})>\gamma\}} f(\underline{s}|H_0) d\mathbf{s} \quad (3.23)$$

Neste trabalho são consideradas as observações de vetor  $\underline{s}$  do tipo gaussiana, que são as observações provenientes dos ecos adicionados de ruídos considerados gaussiano, com médias e variâncias podendo ser determinadas com base nas hipóteses definidas. Usualmente define-se  $H_0$  como o cenário onde não existe sinal desejado, somente ruído, e  $H_1$  como o sinal desejado com ruído. A Figura 7 demonstra os possíveis erros a serem cometidos quando se opta por analisar um parâmetro: escolher  $H_0$  quando ocorre  $H_1$ , existe possibilidade de omissão, ou quando se decide por  $H_1$  quando ocorre  $H_0$  existe falso alarme.



(a) Probabilidade de falso alarme e omissão.



(b) Probabilidade de detecção.

**Figura 7 – Critério de Neyman-Pearson.**  
Fonte: Adaptado García *et al.* (2016)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAIS

Todas as simulações realizadas neste trabalho foram realizadas utilizando o software MATLAB® R2015b. O modelo de análise foi baseado em Miranda (2013) que apresenta uma proposta nova na literatura para a detecção e previsões de fenômenos meteorológicos, e as análises e resultados aqui realizados foram feitos em comparação com os resultados obtidos além de Miranda (2013) com García *et al.* (2016) que apresenta a mesma proposta que o primeiro trabalho citado, porém utilizando um detector subótimo com 3 antenas fixas, e discutindo prováveis resultados de detectores utilizando  $n$  antenas fixas.

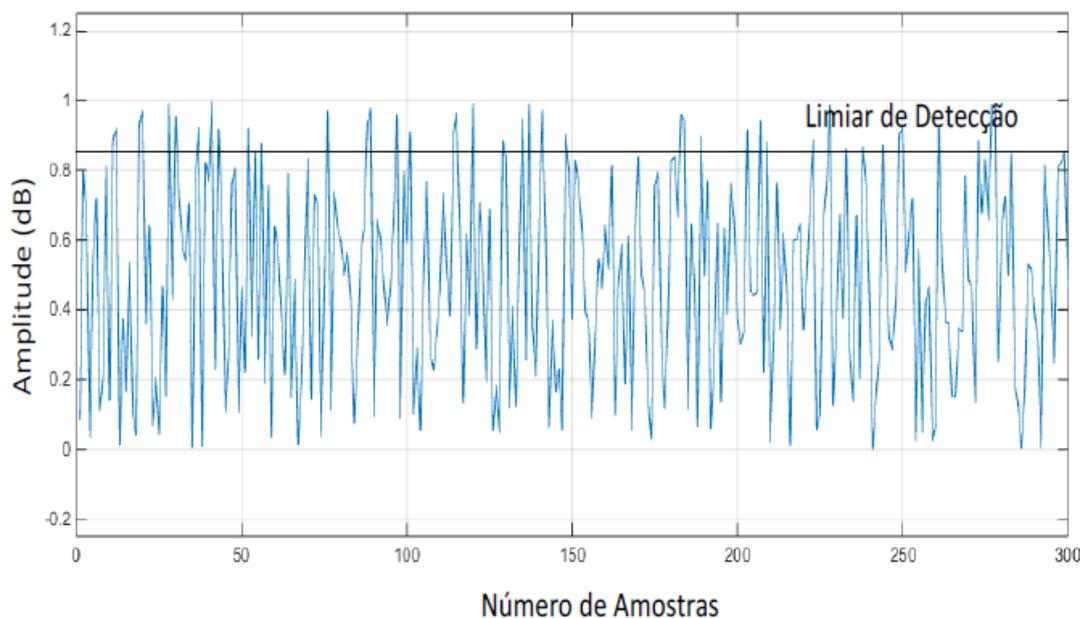
### 4.2 MÉTODOS

#### 4.2.1 Parâmetros de Desempenho do Radar

Como visto na Seção 3.10, em sistemas que constituem radares, o sinal transmitido está sujeito a vários tipos de interferências, por este fator o sinal recebido pelo detector possui um comportamento aleatório. Além das características aleatórias de ruídos adicionadas aos sinais de detecção, tem-se também que em alguns casos os sinais provenientes de alvos possuem características intrínsecas em relação a aleatoriedade de seus ecos, como no caso de nuvens e precipitações (MEISCHNER, 2004). O processo de detecção de um alvo é realizado basicamente realizando a comparação entre a amplitude de um sinal recebido com um determinado limiar, denominado limiar de detecção ou limiar de decisão. Os sinais acima deste limiar são considerados ecos provenientes de alvos, e os sinais abaixo são interpretados como ruídos, ausência de alvo (GARCÍA *et al.*, 2016). A Figura 8 ilustra este processo.

Dada a natureza dos sinais provenientes de alvos, o desempenho do radar é determinado por métodos probabilísticos. Neste caso, são definidas duas propriedades fundamentais: (i) a probabilidade da existência de um alvo que seja caracterizado como tal, denominada como probabilidade de detecção ( $pd$ ) e (ii) a probabilidade de que o ruído seja caracterizado de forma errada como alvo, denominada essa de probabilidade de falso alarme ( $pfa$ ).

Em aplicação deseja-se que um detector efetue simultaneamente um valor máximo de  $pfa$  e um valor mínimo para  $pd$ . Em uma visão abrangente sobre o detector existe o compromisso de uma relação fundamental, que é definida pela escolha do limiar de decisão. Quando se aumenta o limiar, reduz-se  $pfa$ , porém, reduz-se também  $pd$ . Por outro lado, reduzindo o limiar aumenta-se o  $pd$  e conseqüentemente o  $pfa$ . Um caminho frequentemente utilizado para con-



**Figura 8 – Sinal recebido e processo de detecção.**

Fonte: García *et al.* (2016)

tornar este problema, aumentar o  $pd$  e não aumentar, ao menos, o  $pfa$ , é atuar na configuração do radar, elevando a potência de transmissão do radar em relação a potência do ruído, o que pode ocasionar também ruído térmico no sistema. Porém este tipo de influência altera os custos e aumento na demanda de energia do dispositivo. Constitui-se então a necessidade do aperfeiçoamento do projeto detector, relacionando-o com um ganho real para uma dada potência de transmissão disponível.

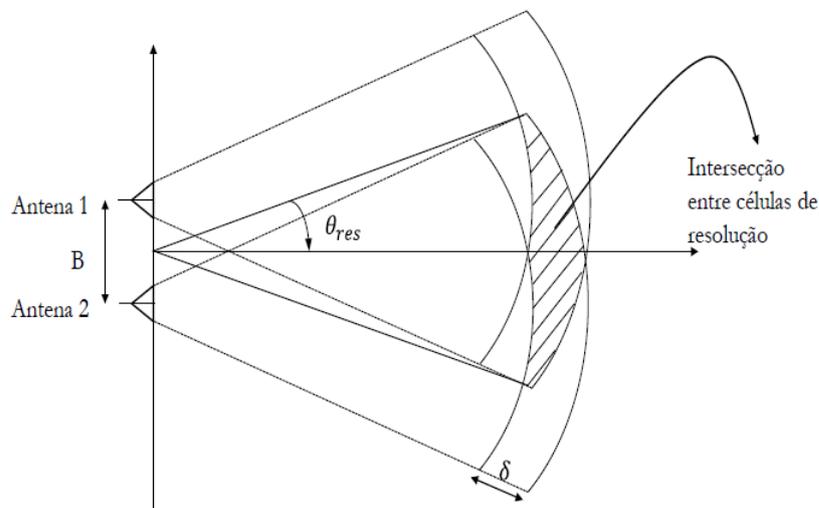
A configuração dos radares tradicionais atuais é baseada principalmente em uma única antena girante de feixe estreito (WADA; HORIKOMI; MIZUTANI, 2009). Porém esta abordagem tradicional pode proporcionar elevando custo de operação, devido sua robustez, além de não ser totalmente adequada para previsões a curto prazo, pois seu ciclo de varredura é demorada. Visto esse caso, uma nova abordagem de previsões meteorológicas foi desenvolvida em (MIRANDA, 2013) como foi discutido na Seção 3.13, retomando de modo mais específico, se existir um alvo meteorológico nas células de intersecção entre as duas antenas, como visto na Figura 9, então os sinais devem ser correlacionados entre si. Caso não ocorra o fenômeno descrito anteriormente os sinais são considerados independentes. Analisando assim, tem-se que os sinais recebidos pelas duas antenas fornecem os parâmetros necessários para o desenvolvimento do algoritmo do detector.

Em Miranda (2013) a correlação foi obtida de forma analítica através dos parâmetros físicos do radar, como largura da banda, de frequência, diretividade das antenas e linha base de comprimento.

Nesta seção são apresentados resultados associados ao detector do radar meteorológico

com antenas fixas, como proposto em Miranda (2013). Especificamente os seguintes itens são estudados:

- Modelagem estocástica do sistema;
- Formulação do teste de hipóteses;
- Definição do critérios de decisão;
- Determinação da variável de decisão;
- Análise de desempenho do detector;



**Figura 9 – Vista superior do sistema de radar composto por duas antenas.**

Fonte: Adaptado García *et al.* (2016)

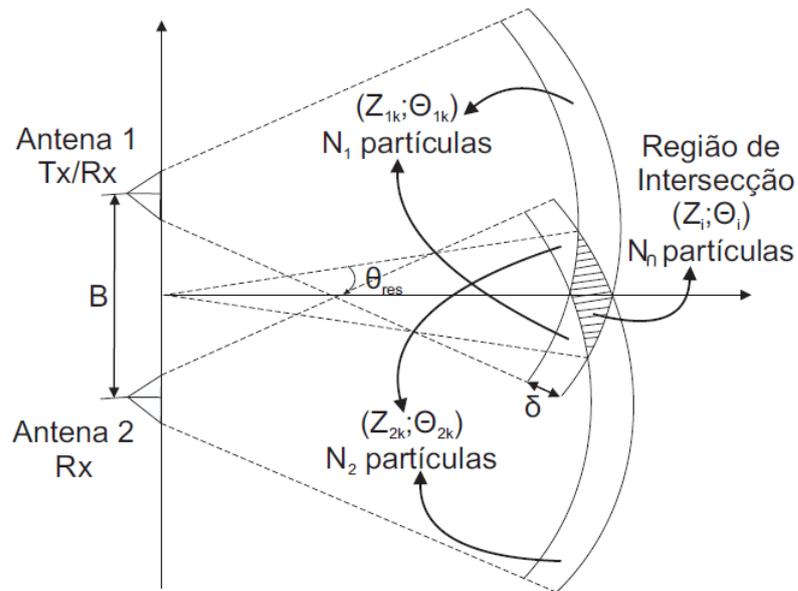
#### 4.2.1.1 Modelagem Estocástica do Sistema

Os sinais recebidos pelas antenas 1 e 2, vistas na Figura 9, são caracterizados pela soma dos sinais provenientes das partículas constituintes de uma determinada célula de resolução que está sob o alcance. Essas partículas representam um possível alvo, como nuvem ou precipitação. Retomando a Seção 3.8 a  $l$ -ésima partícula pode ser representada na forma

$$Z_l = A_l e^{j\Phi_l} \quad (4.1)$$

tem-se que  $Z_l$  é uma variável gaussiana, apresentando simetria circular com média zero e variância  $2\sigma^2$ , a envoltória  $A_l$  é do tipo *Rayleigh* e fase  $-\pi \leq \Phi_l \leq \pi$  distribuída uniformemente. No caso de antenas diretivas, configuração das antenas que constituem o radar estudado deste trabalho (MIRANDA, 2013), é necessário caracterizar uma variável que corresponda a posição

azimutal da partícula. Com isto, cada partícula possui além de  $Z_l$ , uma variável aleatória que corresponde ao azimute  $\Theta_l$ , variável esta que é capaz de influenciar tanto na amplitude quanto na fase do sinal recebido. Cada  $l$ -ésima partícula pode ser representada então pelo par aleatório  $(Z_l; \Theta_l)$ . Considera-se a independência entre os fatores do par aleatório, além da independência entre as várias partículas da região de intersecção. Com o objetivo de facilitar a análise é definido quais são as partículas dentro e fora da região de intersecção das antenas. Neste trabalho partículas que estão dentro da região de intersecção serão denotadas por  $Z_i = A_i e^{j\Phi_i}; \Theta_i$  através de um único subíndice. Partículas que não estiverem contidas na região de intersecção serão denotadas como  $Z_{1k} = A_{1k} e^{j\Phi_{1k}}; \Theta_{1k}$  para a antena 1, e por  $Z_{2k} = A_{2k} e^{j\Phi_{2k}}; \Theta_{2k}$  para antena 2. Além destas denotações é considerado que  $N_\cap$  é o número de partículas existentes no interior da área de intersecção,  $N_1$  a quantidade de partículas dentro da célula de resolução da antena 1 porém fora da região de intersecção, e  $N_2$  a quantidade de partículas dentro da célula de resolução da antena 2 e também fora da região de intersecção. As convenções descritas anteriormente podem ser observadas na Figura 10.



**Figura 10 – Vista superior do sistema de radar composto por duas antenas.**

Fonte: Miranda (2013)

A Figura 10 descreve o sistema do radar estudado, constituído por duas antenas de feixe largo, separados por uma linha base de comprimento  $B$ , onde em um dado valor de alcance é definido  $\delta$  e os feixes de cada antena definem uma faixa de curva que corresponde à célula de resolução de cada antena. Com as considerações feitas os sinais recebidos pelas antenas 1 ( $S_1$ ) e 2 ( $S_2$ ) em um determinado instante podem ser modelados como

$$S_1 = \sum_{i=1}^{N_\cap} Z_i D(\Theta_i) + \sum_{k=1}^{N_1} Z_{1k} D(\Theta_{1k}) \quad (4.2)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^{N_1} Z_i D(\Theta_i) + \sum_{k=1}^{N_2} Z_{2k} D(\Theta_{2k}) \quad (4.3)$$

Tem-se que  $D(\Theta)$  é a função diretividade de cada antena definida em Miranda (2013) como

$$D(\theta) = \left( \frac{1}{N_e} \frac{\sin(N_e \frac{\pi}{2} \sin \theta)}{\sin(\frac{\pi}{2} \sin \theta)} \right)^2 \quad (4.4)$$

com  $N_e$  representando o número de elementos no arranjo, que possui influência na abertura de diretividade.

Agrupado os sinais recebidos das várias partículas definidas, os modelos das Equações (4.2) e (4.3), podem ser representadas em uma forma mais compacta como

$$S_{1i} = X_{1i} + jY_{1i} \quad (4.5)$$

$$S_{2i} = X_{2i} + jY_{2i} \quad (4.6)$$

em que  $i$  representa o tempo discreto,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , com  $n$  o número de amostras observadas, e  $S_{1i}$  e  $S_{2i}$ , sinais de recepção referentes as antenas 1 e 2 respectivamente, possuem características de variáveis conjuntamente gaussianas circularmente simétricas, média nula e variância  $2\sigma^2$ . Como dito anteriormente, quando as partículas estiverem contidas na região de intersecção apresentaram certo grau de correlação, sendo independentes caso contrário. Com o intuito de simplificação agrupa-se as componentes de fase e quadratura como

$$\underline{X} = (X_{11}, X_{21}, \dots, X_{1n}, X_{2n}) \quad (4.7)$$

$$\underline{Y} = (Y_{11}, Y_{21}, \dots, Y_{1n}, Y_{2n}) \quad (4.8)$$

## 4.2.2 Detector para $\rho = K \neq 0$ Conhecido

### 4.2.2.1 Formulação do Teste de Hipóteses

Detectores de radar apresentam em essencial a capacidade em se decidir pela presença ou não do alvo. O detector estudado neste trabalho realiza a detecção para cada região de intersecção entre as células de resolução das duas antenas. E com base nas observações  $\underline{X}$  e  $\underline{Y}$  decidi-se entre as seguintes hipóteses:

- Hipótese  $H_0$ : Não existe alvo. Tem-se que  $\underline{X}$  e  $\underline{Y}$  são componentes Gaussianas mutuamente independentes com média nula e variância  $(\sigma)^2$ ;

- Hipótese  $H_1$ : Existe alvo. Tem-se que  $\underline{X}$  e  $\underline{Y}$  são componentes Gaussianas mutuamente independentes com média nula e variância  $(\sigma)^2$ . Porém neste momento  $X_{1i}$  e  $X_{2i}$  assim como  $Y_{1i}$  e  $Y_{2i}$ , são mutuamente correlacionados, com coeficiente de correlação  $\rho$ ;

Para encontrar a *pd* e *pfa* deste sistema de radar é necessário extrair as FDP's conjuntas das Equações (4.7) e (4.8) que estão condicionadas em cada hipótese,  $H_0$  e  $H_1$ . Tomando o que foi exposto na última seção tais FDP's são obtidas em Miranda *et al.* (2013), em que  $f_z(\cdot)$  denota a FDP de uma variável genérica aleatória  $Z$ ,  $E(\cdot)$  a média estatística,  $VAR(\cdot)$  representa a variância e  $COV(\cdot, \cdot)$  a covariância (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

$$f_{X,Y}(\underline{X}, \underline{Y}|H_0) = \frac{\exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_{1i}^2, X_{2i}^2, \dots, Y_{1i}^2, Y_{2i}^2)}{2\sigma^2} \right]}{[(2\pi)^2 \sigma^4]^n} \quad (4.9)$$

$$f_{X,Y}(\underline{X}, \underline{Y}|H_1) = \frac{\exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_{1i}^2, X_{2i}^2, \dots, Y_{1i}^2, Y_{2i}^2) - 2\rho \sum_{i=1}^n (X_{1i}^2, X_{2i}^2, \dots, Y_{1i}^2, Y_{2i}^2)}{2\sigma^2(1-\rho^2)} \right]}{[(2\pi)^2 \sigma^4]^n (1-\rho^2)^n} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2.2 Definição do Critério de Decisão

O Detector em questão tem como objetivo realizar uma decisão ótima, aquela que fornece a máxima *pd* para uma dada *pfa*, em um teste de decisão binário simples, e que esta decisão é fornecida pelo critério de Neyman-Pearson, equivalente ao teste por razão de verossimilhança. Como visto na Subseção 3.15.2, decide-se por  $H_1$  se a razão de verossimilhança  $\Lambda(\underline{s})$  entre as hipóteses  $H_1$  e  $H_0$  for maior que um certo limiar  $\gamma'$ , e por  $H_0$  caso o contrário, substituindo (4.10) e (4.9) em (4.11) tem-se que para este cenário

$$\Lambda(\underline{s}) \triangleq \frac{f(\underline{s}|H_1)}{f(\underline{s}|H_0)} \underset{H_0}{\underset{H_1}{\geq}} \gamma' \quad (4.11)$$

Por (4.11) caso  $(\underline{s})$  implicar em uma função em que  $\rho \neq 0$  e o resultado da função é maior que um certo valor de  $\gamma'$ , considera-se a presença de alvo, e por (4.11) caso  $(\underline{s})$  implicar em uma função em que  $\rho = 0$  e o resultado da função é menor que um certo valor de  $\gamma'$ , considera-se a não existência de um alvo.

$$\Lambda(\underline{s}) = \frac{\exp \left[ \frac{2\rho \sum_{i=1}^n (X_{1i}X_{2i} + Y_{1i}Y_{2i}) - \rho^2 (X_{1i}^2 + X_{2i}^2 + Y_{1i}^2 + Y_{2i}^2)}{2\sigma^2(1-\rho^2)} \right]}{(1-\rho^2)^n} \quad (4.12)$$

### 4.2.2.3 Determinação da Variável de Decisão

A partir da Equação (4.12) leva-se em conta que a função exponencial é monotonicamente crescente; Com o intuito de reescrever as Equações (4.11) e (4.12) em uma função mais simples  $\underline{s}$  que será comparada com um limiar de detecção  $\gamma$ , tem-se a seguinte função

$$\underline{s} = \frac{2 \sum_{i=1}^n (X_{1i}X_{2i} + Y_{1i}, Y_{2i})}{n} - \frac{K \sum_{i=1}^n (X_{1i}^2 + X_{2i}^2 + Y_{1i}^2 + Y_{2i}^2)}{n} \quad (4.13)$$

observa-se que um dos termos possui a variável  $K$ , conhecida por hipótese do coeficiente de correlação, formulando a nova regra de decisão da seguinte forma

$$\begin{array}{c} H_1 \\ \underline{s} \geq \gamma \\ H_0 \end{array} \quad (4.14)$$

Por (4.14) se  $\underline{s}$  assumir valores maiores que  $\gamma$  define-se pela hipótese  $H_1$  caso o contrário pela hipótese  $H_0$ .

### 4.2.3 Análise e Desempenho do Detector

Através de um número  $n$  de amostras muito elevado, tem-se que do teorema central do limite (MIRANDA, 2013) a variável  $\underline{s}$  pode ser aproximada por uma variável gaussiana, neste caso sua inferência estatística é inteiramente fornecida em termos de sua média e variância. Como exposto em Miranda (2013) através dos resultados finais de médias e variância obtidos do modelo do radar do parâmetro  $\underline{s}$  relacionados as hipóteses. Para uma hipótese  $H_0$  tem-se que  $\rho = 0$  e

$$E\{\underline{s}|H_0\} = -4\rho\sigma^2 \quad (4.15)$$

$$VAR\{\underline{s}|H_0\} = \frac{8(1 + \rho^2)\sigma^4}{n} \quad (4.16)$$

E para uma hipótese  $H_1$  tem-se que  $\rho = K \neq 0$  e

$$E\{\underline{s}|H_1\} = 0 \quad (4.17)$$

$$VAR\{\underline{s}|H_1\} = \frac{8(-1 + \rho^2)^2\sigma^4}{n} \quad (4.18)$$

e através da consideração da variável gaussiana, é possível obter as probabilidades de falso alarme e detecção do detector deste trabalho que é baseado no teste por razão de verossimilhança fornecidas respectivamente por (PAPOULIS; PILLAI, 2002)

$$pfa = Q \left( \frac{\gamma - E\{\bar{s}_n|H_0\}}{\sqrt{VAR\{\bar{s}_n|H_0\}}} \right) \quad (4.19)$$

$$pd = Q \left( \frac{\gamma - E\{\bar{s}_n|H_1\}}{\sqrt{VAR\{\bar{s}_n|H_1\}}} \right) \quad (4.20)$$

em que  $Q(\cdot)$  representa o complemento da função de distribuição acumulada de uma variável gaussiana padrão (média zero e variância unitária)

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt \quad (4.21)$$

Visto isso, substituindo as Equações (4.15) e (4.16) em (4.19), e (4.17) e (4.18) em (4.20), tem-se como resultados as seguintes equações de  $pfa$  e  $pd$  em função dos parâmetros do sistema

$$pfa = Q \left( \frac{\gamma + 4K\sigma^2}{\sqrt{\frac{8(1+K^2)\sigma^4}{n}}} \right) \quad (4.22)$$

$$pd = Q \left( \frac{\gamma}{\sqrt{\frac{8(-1+K^2)^2\sigma^4}{n}}} \right) \quad (4.23)$$

Por finalizar, com os valores conhecidos de  $K$  e  $\sigma$ , e resolvendo o sistema de Equações (4.23) e (4.22), obtém-se para  $\gamma$  e  $n$

$$\gamma = \frac{4K\sigma^2 Q^{-1}(pd)}{Q^{-1}(pd) - \frac{\sqrt{(1+K^2)Q^{-1}(pfa)}}{(-1+K^2)}} \quad (4.24)$$

$$n = \frac{[(1+K^2)Q^{-1}(pd) - \sqrt{(1+K^2)Q^{-1}(pfa)}]^2}{2K^2} \quad (4.25)$$

As Equações (4.24) e (4.25) definidas por Miranda (2013) são de suma importância para este trabalho, pois os valores de probabilidades de detecção e falsa detecção são baseadas inteiramente nelas, a partir do dimensionamento dos valores de limiar e número de amostras.

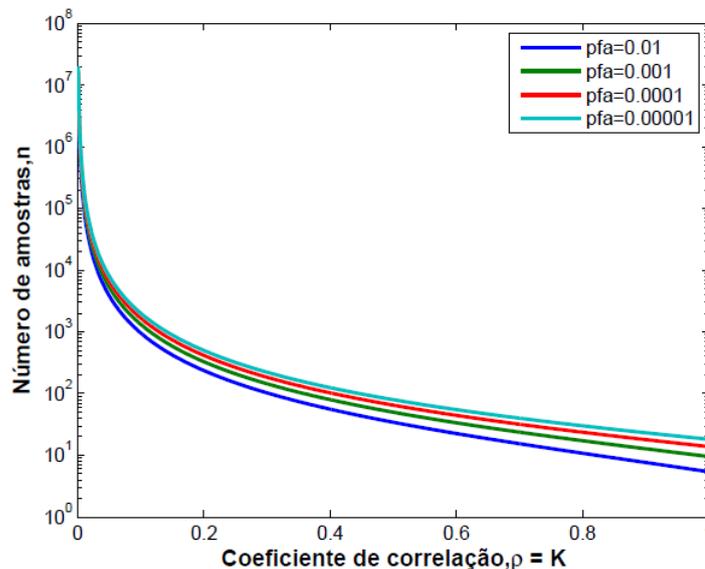
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

#### 5.1.1 Resultados Numéricos para $\rho = K \neq 0$

Em um projeto de detector como este, que tem como objetivo funcionar em tempo real, é de grande importância que as operações matemáticas estejam bem definidas em conjunto com o número de amostras a serem obtidas e o valor do limiar de decisão. Estes parâmetros são extraídos ao se especificar um probabilidade de detecção e uma probabilidade de falso alarme, assim como um valor específico para o coeficiente de correlação  $K$ , que se deseja detectar. Definidos estes parâmetros é possível realizar a análise de desempenho do detector.

Esta análise é realizada a partir da Equação (4.25). Através dessa é possível avaliar que os resultados possuem uma relação bastante restrita com o coeficiente de correlação entre os sinais quando existe a ocorrência de alvo.

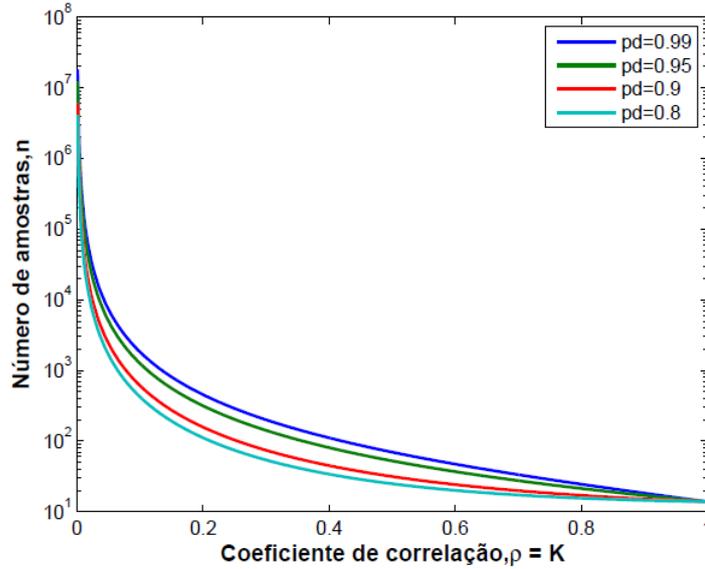


**Figura 11 – Desempenho para  $pd = 0.98$  e  $\sigma = 1$ .**

Fonte: Autoria Própria

A Figura 11 apresenta um conjunto de curvas para variados valores de  $pfa$  com  $pd$  fixado em 0,98 e  $\sigma = 1$ . Pela figura é possível perceber que quanto menor o coeficiente de correlação ( $\rho$ ), mais amostras são necessárias para garantir a probabilidade de detecção. É possível avaliar também que quanto menor é o valor de  $pfa$  mais amostras são necessárias para garantir uma  $pd$  de 0,98 em relação a uma  $pfa$  com maior valor.

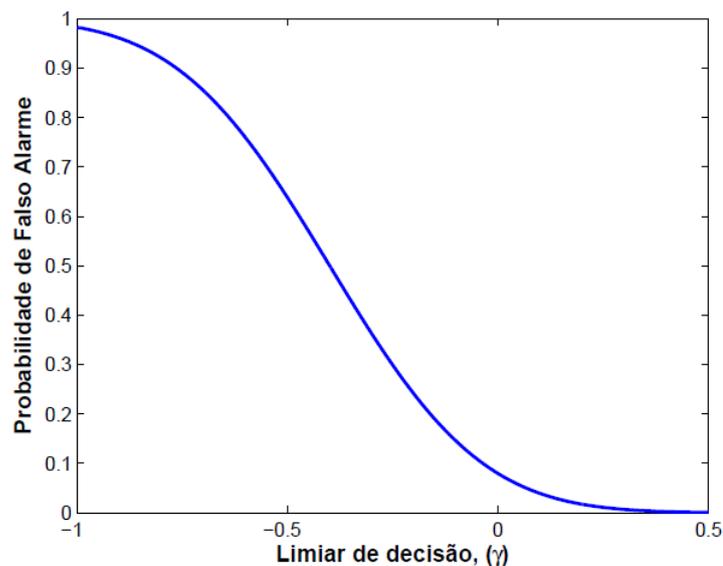
A Figura 12 apresenta uma família de curvas para diferentes valores de  $pd$ , com um  $pfa$  fixado em  $10^{-4}$  e  $\sigma = 1$ . Realizada a observação semelhante a da Figura 11, percebe-



**Figura 12 – Desempenho para  $pfa = 0.0001$  e  $\sigma = 1$ .**  
 Fonte: Autoria Própria

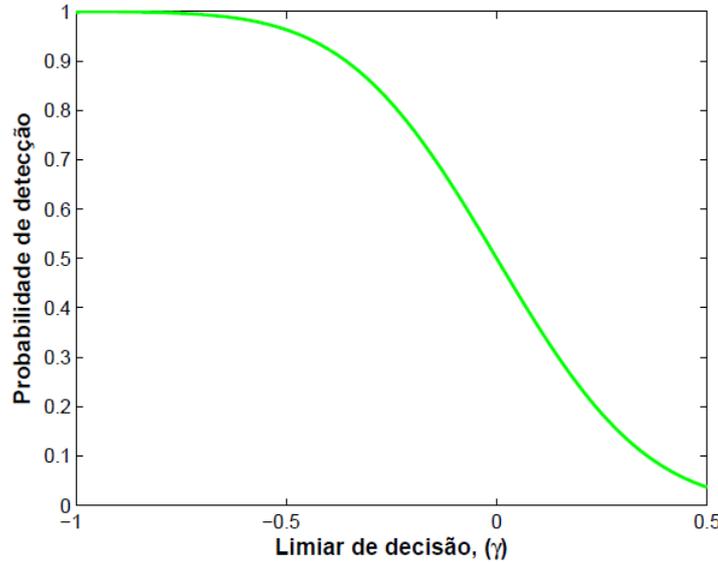
se que quanto menor o coeficiente de correlação mais amostras são necessárias para garantir a determinada probabilidade de falso alarme. Em relação ao valor estimado para  $pd$ , pode-se observar que para um dado valor de  $pfa$  quanto maior for o valor de  $pd$  menor será o número de amostras em relação a um valor menor de  $pd$ , para garantir a  $pfa$ .

A Figura 13 apresenta os resultados relacionados a (4.22), com  $n = 100$  e  $\sigma = 1$ . Na figura é possível observar o que é discutido no início da Subseção 4.2.1, quanto maior for o valor da variável de decisão, menor será a probabilidade de falso alarme, e retomando a Figura 11 para uma  $pfa$  baixa como  $10^{-5}$ , com um certo valor de  $pd$  fixo, mais amostras serão necessárias para que o detector garanta a probabilidade de detecção, em relação a uma  $pfa$ .



**Figura 13 –  $pfa$  e  $\gamma$ .**  
 Fonte: Autoria Própria

Na Figura 14 são representados os resultados referidos à Equação (4.23), com os mesmos parâmetros adotados na Figura 13, e também nota-se que a relação entre  $pd$  e a variável de decisão é semelhante a da Figura 13, porém  $pd$  se estabelece por determinados valores do limiar em sua probabilidade máxima, e se torna decrescente a partir de determinados valores do limiar de decisão.



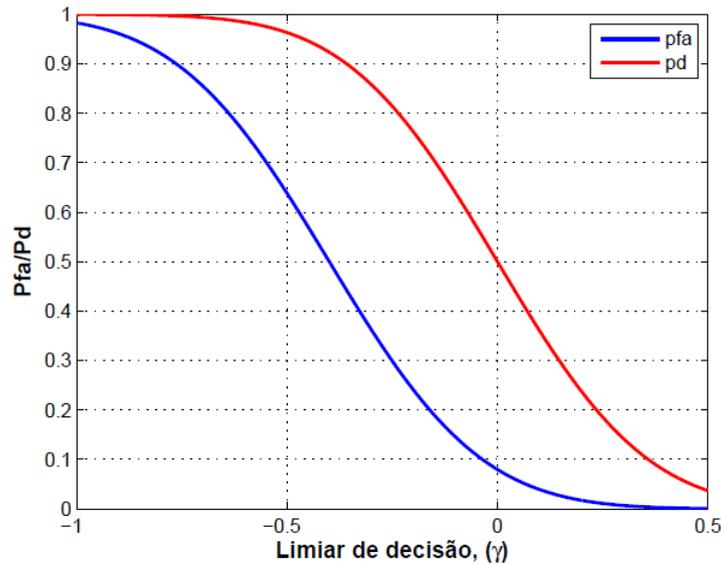
**Figura 14** –  $pd$  e  $\gamma$ .  
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 15 se estabelece uma importante relação entre  $pd$ ,  $pfa$  e  $\gamma$ , é possível que a probabilidade de detecção tende a ser maximizada em relação a probabilidade de falso alarme, a curva de falso alarme decresce mais rápido, com o aumento do valor de limiar de decisão menor será a probabilidade de falso alarme, e maior será a probabilidade de detecção.

### 5.1.2 Resultados Numéricos para $\rho \neq K$

Em Miranda (2013) e García *et al.* (2016) é discutido que detectores como o deste trabalho, que atuam em tempo real, devem ter suas operações bem definidas e buscar ao máximo a otimização de suas funções. É de grande importância que os parâmetros necessários para a operação do detector sejam calculados apenas uma vez, porém a implementação do coeficiente de correlação envolve bastante complexidade, além de que o recálculo do limiar de decisão apresenta um custo computacional bastante elevado e complexo. É avaliada então a influência de um valor de  $K$  que seja diferente do valor do coeficiente de correlação. Tem-se então, que através dos cálculos da média e variância de (4.13)

$$E\{\bar{s}\} = 4(\rho - K)\sigma^2 \quad (5.1)$$



**Figura 15 – Comparação  $pd$ ,  $pfa$  pela variável de Decisão.**

Fonte: Autoria Própria

$$VAR\{\bar{s}\} = \frac{8\sigma^4(1 - 4K\rho + \rho^2 + K^2(1 + \rho^2))}{n} \quad (5.2)$$

Para a hipótese  $H_0$  ( $\rho = 0$ ) sob estas condições tem-se novamente (4.15) e (4.16) pois elas não dependem do coeficiente de correlação, porém obtendo as seguintes expressões de média e variância respectivamente, em relação a  $H_1$

$$E\{\bar{s}|H_1\} = 4(\rho - K)\sigma^2 \quad (5.3)$$

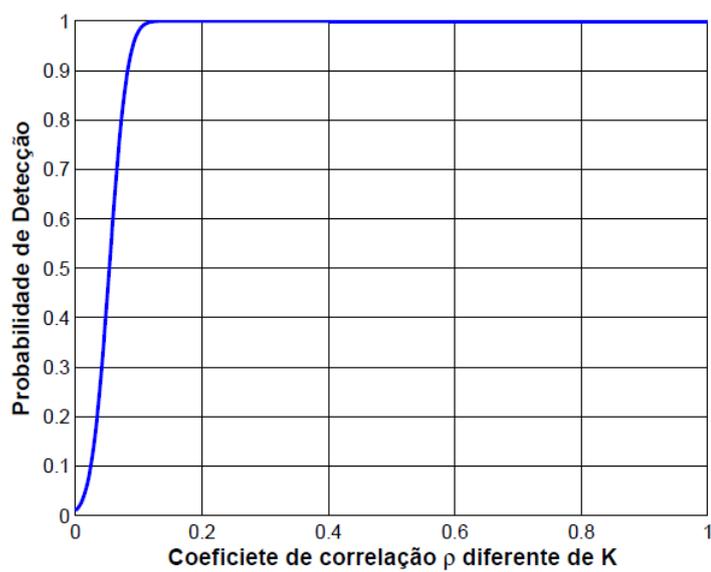
$$VAR\{\bar{s}|H_1\} = \frac{8\sigma^4(1 - 4K\rho + \rho^2 + K^2(1 + \rho^2))}{n} \quad (5.4)$$

tem-se então (5.5) para uma  $pd$  com  $K \neq \rho$

$$pd = Q \left( \frac{\gamma - 4(\rho - K)\sigma^2}{\sqrt{\frac{8\sigma^4(1 - 4K\rho + \rho^2 + K^2(1 + \rho^2))}{n}}} \right) \quad (5.5)$$

Observando (4.25) e (4.24), para uma desejada  $pd$  e  $pfa$  equivalente à 0,98 e 0,01 respectivamente, e com um  $K$  igual 0.1, tem-se um limiar de -0.186 e um número de amostras de 955. Aplicando estes valores em (5.5) obtém-se a Figura 16.

Pela Figura 16 é possível observar que quando  $\rho$  é superior em relação a  $K$  a probabilidade de detecção atinge o valor unitária alcançando a eficácia necessária para a identificação de um alvo. Visto isso, ao se definir o projeto de um detector deve-se levar em consideração um  $K$  mínimo, caso  $K \neq \rho$  para garantir maior probabilidade de detecção.



**Figura 16 – Comparação  $p_d$ , com  $\rho \neq K$ .**  
Fonte: Autoria Própria

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Através do desenvolvimento deste trabalho gerou-se diversas observações conclusivas sobre o funcionamento do detector proposto. Observou-se também alguns fatores que podem ser estudados em trabalhos futuros para melhorar o desempenho do mesmo e obter um bom radar de acordo com o proposto por Miranda (2013).

### 6.1 CONCLUSÕES

Os ecos provenientes de um alvo, quando retornam para a antena receptora do radar são submetidos a diversos processos de tratamentos de sinais, pois apresentam ruídos indesejados oriundos de diversos fatores, como a influência térmica do sistema, a influência do meio sobre os sinais emitidos, a qualidade do equipamento entre outros. Devido a estes aspectos o detector de um radar opera através de métodos probabilísticos, determinando a probabilidade de um sinal recebido ser eco de um alvo.

Um bom detector é aquele que sua resposta apresenta uma alta probabilidade de detecção e uma baixa probabilidade de falso alarme, caso haja a ocorrência de alvo.

Sob estes conceitos, este trabalho apresenta uma análise de desempenho de um detector que opera sob o critério por razão de verossimilhança (MIRANDA, 2013), e compõe um sistema de radar composto por 2 antenas fixas afastadas entre si, de feixe largo. Este sistema de radar foi proposto por Miranda (2013).

Quando ocorrer a existência de alvo nas regiões de intersecção de "iluminação" das antenas, os ecos recebidos, após um processo de tratamento de sinais, irão ser correlacionados. Sob um limiar de detecção pré-definido, número de amostras de ecos recebidos e o coeficiente de correlação é possível determinar a probabilidade de detecção de um alvo e a probabilidade de que o sinal recebido seja de falso alarme.

Para se realizar a análise de desempenho deste detector, este trabalho apresentou um estudo de seu ferramental matemático, iniciando na caracterização matemática dos ecos provenientes de alvos distribuídos, considerando-os ruídos gaussianos brancos. Através das hipóteses de detecção, (detecção ou falso alarme), foi determinado as Funções de Densidade de Probabilidade (FDP) das hipóteses com seus respectivos coeficientes de correlação. Com as FDP's, através da definição do critério por razão de verossimilhança foi então determinada a regra de decisão, a variável de decisão, e com isto as Equações (4.20) e (4.19), que são as equações de  $pd$  e  $pfa$  respectivamente.

Através das Equações 4.20 e 4.19, é possível então avaliar o desempenho do detector em relação a diversos fatores, como a influência do coeficiente de correlação, do número de amostras, e o impacto de determinados valores definidos para o limiar de detecção. E com a

análise da influência destes fatores determinar os valores mínimos necessários do coeficiente de correlação, número de amostras e limiar de detecção, para garantir uma certa probabilidade de detecção e de falso alarme.

Pela Figura 11 percebe-se que quando  $pfa = 10^{-5}$  mais amostras serão necessárias para se determinar uma  $pd = 0.98$ , em relação a uma  $pfa = 10^{-2}$  e considerando um determinado coeficiente de correlação. Com isto, pode-se concluir que quanto menor for a  $pfa$  desejada para um determinado coeficiente de correlação e uma  $pd$ , maior será o número de amostras necessárias para garantir estas condições desejadas de uma  $pd$ .

Através da Figura 12 quando  $pd = 0.99$  maior será o número necessárias para garantir uma certa  $pfa$  em relação a  $pd$ , do que quando  $pd = 0.8$ . Pode-se então concluir, que quanto maior a probabilidade de detecção desejada, maior será o número de amostras necessárias.

Com o exposto nos últimos dois parágrafos, pode-se concluir que o número de amostras está intrinsecamente relacionado ao bom desempenho de um detector por critério razão de verossimilhança, quanto maior o número de amostras melhor será a aplicação deste critério, menor será a  $pfa$  para uma  $pd$  como na Figura 11 e maior será  $pd$  para uma dada  $pfa$  como exposto na Figura 12.

Em ambas as Figuras 11 e 12 conclui-se também que quanto maior o coeficiente de correlação menor será o número de amostras necessárias para garantir a relação descrita nos últimos três parágrafos.

Através da Figura 15 tem-se a caracterização de um detector ótimo, nela é possível concluir que para um determinado valores de número de amostras, coeficiente de correlação e limiar de decisão, a probabilidade de detecção irá ser sempre superior a de falso alarme. Observando o caso de com  $n = 100$  e  $\rho = 0.3$ , dados iguais das Figuras 14 e 15, com um valor adotado de limiar igual a  $-0.5$  a probabilidade de detecção é de aproximadamente 40% superior em relação a probabilidade de falso alarme.

Em alguns casos deste detector observou-se que para garantir uma determinada  $pd$  e  $pfa$ , ele necessita de um número elevado de amostras, e caso ocorra algum erro no processamento das informações o detector deverá realizar o reprocessamento, reprocessamente este que para um número elevado de amostras se torna inviável, pois a tela de um radar necessita ser atualizada em dezenas de segundos, e neste caso poderia alcançar um valor aproximado de 166.66 horas (MIRANDA, 2013), sendo este tempo totalmente inviável.

Visto isso, para garantir que quando ocorra um erro com o coeficiente de correlação esperado, para um processamento eficaz é escolhido um  $\rho$  mínimo, caso  $\rho$ , capaz de garantir uma boa probabilidade de detecção, como visto na Figura 16 implementada pela Equação (5.5), caso espera-se um determinado valor  $K$ , no caso  $k = 0.3$ , determina-se um valor mínimo necessário de  $K$  para garantir um valor máximo de  $pd$ .

Com isto pode-se concluir que através da análise de desempenho do detector deste trabalho, a qualidade do funcionamento do mesmo está intimamente ligada ao número de amos-

tras, sendo que para um número elevado de amostras de este detector pode se tornar inviável para aplicações a curto a prazo.

## 6.2 PERSPECTIVAS

Para estudos futuros com objetivo de explorar e alcançar o melhor funcionamento deste detector, pode ser explorada a obtenção de um coeficiente correlação coerente de acordo com o cenário. Este estudo pode ser desenvolvido através da análise da posição geométrica das antenas, em conjunto com a análise das características funcionais das mesmas, como diretividade e padrão de radiação (GARCÍA *et al.*, 2016).

Recentemente García *et al.* (2016) realizou um estudo de detectores, sendo eles ótimos e sub-ótimos, que compõem um radar composto por 3 antenas fixas que apresentam características semelhantes as apresentadas em Miranda (2013). Este trabalho analisou a eficiência destes detectores quando aplicados, nele foi indicado que uma estratégia bastante promissora seria a exploração do número de antenas que compõem o radar em busca de um número maior de coeficientes de correlação e consequentemente uma real representação do ambiente.

## REFERÊNCIAS

- BRINGI, V.; CHANDRASEKAR, V. **Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- CHARTS, A. Ieee aerospace and electronic systems society (ieee-aess). **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 3, n. Part 2, p. 36, 2000.
- GARCÍA, F. D. A. *et al.* **Detecção ótima e subótima para um radar meteorológico com três antenas fixas de feixe largo**. Tese (Doutorado) — UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2016.
- LATHI, B.; DING, Z. **Sistemas de comunicações analógicos e digitais modernos. 4a edição, LTC**, 2012.
- LUTGENS, F. e **EJ TARBUCK**, **The Atmosphere: an introduction to Meteorology**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- MACEDO, E. S. d. Desastres naturais: Causas e conseqüências. **Geociências (São Paulo)**, Geociências (São Paulo), v. 27, n. 1, p. 137–139, 2008.
- MEISCHNER, P. **Weather radar: principles and advanced applications**. New Yourk, NY: Springer Science & Business Media, 2004.
- MIRANDA, M. A. M. **Radar Meteorológico com Antenas Fixas: Proposta, Modelagem e Análise de Desempenho**. Tese (Doutorado) — UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2013.
- MIRANDA, M. A. M. *et al.* Radar meteorológico com antenas fixas: Projeto e análise de detector ótimo. **XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, 2013.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W. **Discrete-time signal processing**. Englewood Cliffs, UK: Pearson Higher Education, 2010.
- PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, random variables, and stochastic processes**. oi: Tata McGraw-Hill Education, 2002.
- SHNIDMAN, D. A. Radar detection in clutter. **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 41, n. 3, p. 1056–1067, 2005.
- SKOLNIK, M. **Radar Handbook, Vol. 1, 8**. New York, NY: McGraw Hill Press, 2008.
- WADA, M.; HORIKOMI, J.; MIZUTANI, F. Development of solid-state weather radar. In: **IEEE. 2009 IEEE Radar Conference**. Osaka, Japan, 2009. p. 1–4.

## APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÕES REALIZADAS

### A.1 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.22

```
function respfa = pfa(gama,n,sigma,K)
num = ((gama)+(4*K*(sigma2)));
den = ( sqrt(((8*(1+(K.2))) * (sigma4))/(n)));
respfa = qfunc(num/den);
```

### A.2 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.23

```
function respd = pd(gama,n,sigma,K)
num = (gama);
den = ( sqrt(((8*(-1+(K2))2) * (sigma4))/(n)));
respd = qfunc(num/den);
```

### A.3 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.24

```
function lim = limiar(Pd,Pfa,K,sigma)
pdy = qfuncinv(Pd);
pfay = qfuncinv(Pfa);
x = abs(-1+(K2));
y = ( (sqrt(1+(K2))) * pfay)
num = (4*K*(sigma2) * pdy)
den=( pdy - (y/x))
lim = -(num/den);
```

### A.4 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 4.25

```
function na = namostras(Pd,Pfa,K)
pdy = qfuncinv(Pd);
pfay = qfuncinv(Pfa);
```

```

x = abs(-1+(K.^2));
num= ((x *(pdy)) - ((sqrt(1+K.^2) * pfa)))).^2;
den=(2*K.^2);
na = (num./den);

```

#### A.5 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DA EQUAÇÃO 5.5

```

function Pdk = limiar(gamma,rho,K,sigma,n)
num = ( gamma - ( 4 * (rho - K) * (sigma^2)))
den = sqrt ( ( ( 8 * (sigma^4) * (1 - (4 * K * rho) + (rho.^2) + ((K^2) * (1 + rho.^2)))))) / n)
x = ( num./den);
Pdk = qfunc(x);

```

#### A.6 IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.1

```

clc
close all
clear all
K=0:0.001:1;
n2 = namostras(0.98,10^-2, K);
n3 = namostras(0.98,10^-3, K);
n4 = namostras(0.98,10^-4, K);
n5 = namostras(0.98,10^-5, K);
figure(1)
semilogy(K,n2,K,n3,K,n4,K,n5,'linewidth',1.8);
grid on;
set(gca, 'GridLineStyle','-');
legend('pfa=0.01','pfa=0.001','pfa=0.0001','pfa=0.00001');
xlabel('Coeficiente de correlação, ρ = K','FontSize',12,'FontWeight','bold');
ylabel('Número de amostras,n','FontSize',12,'FontWeight','bold');

```

## A.7 IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.2

```

clc
close all
clear all
n2 = namostras(0.99,0.0001,K);
n4 = namostras(0.9,0.0001,K);
n6 = namostras(0.4,0.0001,K);
n8 = namostras(0.2,0.0001,K);
figure(1)
semilogy(K,n2,K,n4,K,n6,K,n8,'linewidth',1.5)
grid on;
set(gca, 'GridLineStyle','-');
legend('pd=0.99','pd=0.95','pd=0.9','pd=0.8','pd=0.4','pd=0.3','pd=0.2')
xlabel('Coeficiente de correlação,  $\rho = K$ ','FontSize',12,'FontWeight','bold')
ylabel('Número de amostras, n','FontSize',12,'FontWeight','bold')

```

## A.8 IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.3

```

clc
close all
clear all
gama = -1:0.001:0.5
pfa1 = pfa(gama,100,1,0.1);
figure(1)
plot(gama,pfa1,'linewidth',1.7)
grid on;
legend('pd=0.99','pd=0.95','pd=0.9','pd=0.8','pd=0.4','pd=0.3','pd=0.2')
xlabel('Limiar de decisão, ( $\gamma$ )','FontSize',12,'FontWeight','bold')
ylabel('Probabilidade de Falso Alarme','FontSize',12,'FontWeight','bold')

```

## A.9 IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.4

```

clc
close all
clear all
gama = -1:0.001:0.5
pd1 = pd(gama,100,1,0.1);
figure(1)
plot(gama,pd1,'g','linewidth',1.7)
grid on;
legend('pd=0.99','pd=0.95','pd=0.9','pd=0.8','pd=0.4','pd=0.3','pd=0.2')
xlabel('Limiar de decisão, ( $\gamma$ )','FontSize',12,'FontWeight','bold')
ylabel('Probabilidade de detecção','FontSize',12,'FontWeight','bold')

```

## A.10 IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.5

```

clc
close all
clear all
gama = -1:0.001:0.5
pfa1 = pfa(gama,100,1,0.1);
figure(1)
plot(gama,pfa1,'linewidth',1.7)
grid on;
hold on;
plot(gama,pd1,'r','linewidth',1.7)
legend('pfa','pd')
xlabel('Limiar de decisão, ( $\gamma$ )','FontSize',12,'FontWeight','bold')
ylabel('Pfa/Pd','FontSize',12,'FontWeight','bold')

```

## A.11 IMPLEMENTAÇÃO DA FIGURA 1.6

```

clc

```

```
close all
clear all
gamma = - 0.186
rho= 0:0.001:1
K=0.1
n= 956;
sigma=1;
num = ( gamma - ( 4 * (rho - K) * (sigma^2)))
den = sqrt ( ( ( 8 * (sigma^4) * (1 - (4 * K * rho) + (rho.^2) + ((K^2) * (1 + rho.^2)))))/n)
x = ( num./den);
Pd = qfunc(x);
figure(1)
plot(rho,Pd,'linewidth',1.8);
grid on;
set(gca, 'GridLineStyle','-');
xlabel('Coeficiente de correlação  $\rho$  diferente de K','FontSize',12,'FontWeight','bold');
ylabel('Probabilidade de Detecção','FontSize',12,'FontWeight','bold');
```