



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “PROCESADORES DE SEÑALES DE RADAR RAYLEIGH Y  
WEIBULL CFAR”**

**AUTORES: GUALAVISÍ SOSA, LUIS ANDRÉS  
LLUMIQUINGA SUNTAXI, ISABEL CRISTINA**

**DIRECTOR: M.Sc. LEÓN VÁSQUEZ, RUBÉN DARÍO**

**SANGOLQUÍ**

**2020**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**PROCESADORES DE SEÑALES DE RADAR RAYLEIGH Y WEIBULL CFAR**” fue realizado por el señor GUALAVISÍ SOSA LUIS ANDRÉS y la señorita LLUMIQUINGA SUNTAXI ISABEL CRISTINA, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 14 de enero de 2020

**M.Sc. Rubén Darío León Vásquez**  
C.I. 1801654284  
Investigador CICTE-DEET-ESPE



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, GUALAVISÍ SOSA LUIS ANDRÉS, con cédula de identidad No. 1721299970 y Yo, LLUMIQUINGA SUNTAXI ISABEL CRISTINA, con cédula de identidad No. 1722294996, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación “**PROCESADORES DE SEÑALES DE RADAR RAYLEIGH Y WEIBULL CFAR**” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de enero de 2020

**Gualavisí Sosa Luis Andrés**

C.I. 1721299970

**Llumiquinga Suntaxi Isabel Cristina**

C.I. 1722294996



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, GUALAVISÍ SOSA LUIS ANDRÉS, con cédula de identidad No. 1721299970 y Yo, LLUMIQUINGA SUNTAXI ISABEL CRISTINA, con cédula de identidad No. 1722294996, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**PROCESADORES DE SEÑALES DE RADAR RAYLEIGH Y WEIBULL CFAR**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 14 de enero de 2020

.....

**Gualavisí Sosa Luis Andrés**

C.I. 1721299970

.....

**Llumiquinga Suntaxi Isabel Cristina**

C.I. 1722294996

## DEDICATORIA

*Nuestro trabajo de titulación lo dedicamos principalmente a Dios, por inspirarnos y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de nuestros anhelos más deseados.*

*A nuestros queridos padres, por su amor, trabajo, paciencia y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser sus hijos, son los mejores padres.*

*A nuestros hermanos (as) por estar siempre presentes, acompañándonos y por brindarnos el apoyo moral a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.*

*A todas las personas que nos han apoyado incondicionalmente y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus valiosos conocimientos.*

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Mi profundo agradecimiento a todos nuestros docentes del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, por haber compartido de forma desinteresada y con paciencia sus conocimientos y habilidades a lo largo de la preparación de nuestra profesión, serán de gran utilidad para la vida profesional y nos permitirán construir un futuro mejor para la sociedad.

Agradecemos de manera especial al Dr. David Fernandes, Ingeniero Rubén León y al Ingeniero Alexis Tinoco quienes, con la enseñanza de sus valiosos conocimientos nos han guiado con paciencia y rectitud como docentes, hicieron que podamos crecer día a día como profesionales.

Agradecemos a su vez también al personal militar y civil que conforman el Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CICTE) que contribuyeron para que el presente proyecto pueda llevarse a cabo con éxito.

Luis Gualavisí e Isabel Llumiquinga

## INDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>3</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Justificación e Importancia.....	4
1.3 Alcance del Proyecto.....	5
1.4 Objetivos .....	6
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>8</b>
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1 Radar .....	8
2.2 Clasificación de Distribuciones.....	9
2.3 Nivel de Umbral con Detector de Ley Cuadrática .....	12
2.4 Modelos de Destino.....	13
2.5 Clutter Marítimo.....	14

2.6 Probabilidad de Detección.....	15
2.7 Probabilidad de Falsa Alarma .....	15
2.8 Conceptos de Tasa de falsa alarma constante (CFAR) .....	16
2.9 Aplicaciones de Procesadores CFAR.....	25
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>26</b>
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	26
3.1 Diagrama de Bloques de Funcionamiento .....	26
3.2 Generación de Clutter con distribución Weibull.....	26
3.3 Generación de blancos en base al radar OERLIKON .....	28
3.4 Inserción de blancos en clutter Weibull .....	30
3.5 Parámetros de Procesadores CFAR.....	31
3.6 Digitalización de Señales de Radar .....	34
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>36</b>
4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	36
4.1. Simulación de señal de clutter Weibull con Objetivos .....	36
4.2 Entradas y Salidas de procesador CFAR (Umbral de detección) .....	38
4.3 Evaluación de Ventanas de Procesadores CFAR .....	42
4.4 Curvas Operacionales de Receptor ROC .....	45
4.5 Costo Computacional .....	51
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>56</b>
Conclusiones .....	56
Recomendaciones.....	57
<b>Referencias.....</b>	<b>58</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Comparación de distribuciones que han sido utilizadas para modelar el clutter marino..</i>	12
<b>Tabla 2</b> <i>Modelos de destino Swerling.....</i>	13
<b>Tabla 3</b> <i>Valores de m para los diferentes procesadores .....</i>	33
<b>Tabla 4</b> <i>Valores iniciales para el cálculo de umbrales y probabilidad de detección .....</i>	38
<b>Tabla 5</b> <i>Umbrales de detección prácticos (<math>T_p</math>), <math>P_{fa} = 10^{-3}</math> .....</i>	41
<b>Tabla 6</b> <i>Umbrales de detección prácticos (<math>T_p</math>), <math>P_{fa} = 10^{-4}</math> .....</i>	42
<b>Tabla 7</b> <i>Umbrales de detección prácticos (<math>T_p</math>), <math>P_{fa} = 10^{-5}</math> .....</i>	42
<b>Tabla 8</b> <i>Probabilidad de detección a partir de 80%.....</i>	50
<b>Tabla 9</b> <i>Costo Computacional.....</i>	51
<b>Tabla 10</b> <i>Costo Computacional Procesador CA-CFAR.....</i>	52
<b>Tabla 11</b> <i>Costo Computacional Procesador SO-CFAR.....</i>	53
<b>Tabla 12</b> <i>Costo Computacional Procesador GO-CFAR .....</i>	54
<b>Tabla 13</b> <i>Costo Computacional Procesador OS-CFAR.....</i>	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de bloques básico de un sistema de radar. ....	9
<b>Figura 2.</b> Diagrama general de procesador CFAR. ....	17
<b>Figura 3.</b> Arquitectura de procesador CFAR de Promedio de Celdas. ....	20
<b>Figura 4.</b> Arquitectura de procesador CFAR de mayor promedio de celdas. ....	21
<b>Figura 5.</b> Arquitectura de procesador CFAR de menor promedio de celdas. ....	23
<b>Figura 6.</b> Arquitectura de procesador CFAR de estadísticas ordenadas. ....	24
<b>Figura 7.</b> Diagrama de Bloques de Funcionamiento. ....	26
<b>Figura 8.</b> Transformación no lineal sin memoria. ....	27
<b>Figura 9.</b> Oscilador de señal mixta TEKTRONIX MSO 4104. ....	35
<b>Figura 10.</b> Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=-3dB.....	36
<b>Figura 11.</b> Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=0dB.....	37
<b>Figura 12.</b> Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=3dB.....	37
<b>Figura 13.</b> Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=3dB.....	38
<b>Figura 14.</b> Entrada de Procesador CFAR vs Umbral Teórico, $P_{fa}=10^{-3}$ .....	39
<b>Figura 15.</b> Entrada de Procesador CFAR vs Umbral Teórico, $P_{fa}=10^{-4}$ .....	40
<b>Figura 16.</b> Entrada de Procesador CFAR vs Umbral Teórico, $P_{fa}=10^{-5}$ .....	40
<b>Figura 17.</b> Detección de objetivo, Ventana $N=64$ y $P_{fa}=10^{-3}$ .....	43
<b>Figura 18.</b> Detección de objetivo, Ventana $N=32$ y $P_{fa}=10^{-3}$ .....	44
<b>Figura 19.</b> Detección de objetivo, Ventana $N=16$ y $P_{fa}=10^{-3}$ .....	45
<b>Figura 20.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC, $P_{fa}=10^{-3}$ .....	46
<b>Figura 21.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC, $P_{fa}=10^{-4}$ .....	46
<b>Figura 22.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC, $P_{fa}=10^{-5}$ .....	47
<b>Figura 23.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC CA-CFAR. ....	48
<b>Figura 24.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC SOCA-CFAR. ....	48
<b>Figura 25.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC GOCA-CFAR.....	49
<b>Figura 26.</b> Curvas Operacionales de Receptor ROC OS-CFAR.....	49

## RESUMEN

El proyecto desarrollará un sistema procesador digital de la señal de radar clásico, con alta probabilidad de detección, para una tasa constante de falsas alarmas (CFAR) del tipo Rayleigh y Weibull, para relaciones señal a interferencias alrededor o superiores a los 6 dB. El proyecto propuesto pretende hacer efectiva la aplicación de políticas y planes para el desarrollo tecnológico en el ámbito de la seguridad nacional y protección de puntos estratégicos de alto interés económico, aumentando la eficiencia y la efectividad de respuesta del sistema de defensa aérea en situaciones de riesgo que requieran atención y reacción inmediata. Para ello, se realizó las siguientes actividades: a) estudio y análisis de técnicas bayesianas Moving Target Indicator (MTI) en cascada con procesadores CFAR del tipo Rayleigh y Weibull e implementación en un ambiente de radar controlado de la relación señal/interferencia para obtener las curvas operacionales de receptor (*ROC*), b) comparación del desempeño de los procesadores implementados con el clásico Moving Target Indicator (MTI) sin CFAR y c) implementación en tiempo no real, en MATLAB utilizando los toolbox disponibles para el efecto, así como también la digitalización de las señales I y Q generadas por el radar de vigilancia del sistema denominado *OERLIKON*.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **RAYLEIGH CFAR**
- **WEIBULL CFAR**
- **TASA CONSTANTE DE FALSAS ALARMAS**
- **INDICADOR DE OBJETIVO EN MOVIMIENTO**
- **CURVAS OPERACIONALES DEL RECEPTOR**

## ABSTRACT

The project will develop a classic digital radar signal processing system, with high probability of detection, for a constant rate of false alarms (CFAR) of the Rayleigh and Weibull type, for signal to interference ratios around or greater than 6 dB. The proposed project aims to make effective the application of policies and plans for technological development in the field of national security and protection of strategic points of high economic interest, increasing the efficiency and effectiveness of the air defense system response in risk situations that require immediate attention and reaction. For this, the following activities will be carried out: a) study and analysis of Bayesian techniques Moving Target Indicator (MTI) in cascade with CFAR processors of the Rayleigh and Weibull type and implementation in a controlled radar environment of the signal / interference ratio to obtain the receiver operational curves (*ROC*), b) comparison of the performance of the processors implemented with the classic Moving Target Indicator (MTI) without CFAR and c) non-real-time implementation, in MATLAB using the toolboxes available for this purpose, as well as the digitization of the I and Q signals generated by the surveillance radar of the called *OERLIKON* system.

### KEYWORDS:

- **RAYLEIGH CFAR**
- **WEIBULL CFAR**
- **CONSTANT FALSE ALARM RATE**
- **MOVING TARGET INDICATOR**
- **RECEIVER OPERATIONAL CURVES**

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes

En la actualidad, sistemas de radar de vigilancia como el de OERLIKON operan con procesadores de tipo bayesianos de señales de radar cuya investigación básica se fundamenta en las décadas de los años 70 y 80 del siglo pasado. Por otro lado, el Ejército ecuatoriano, dispone del sistema de artillería antiaérea *OERLIKON* de origen suizo, adquirido en 1979. En este sistema el procesador implementado es el denominado *Moving Target Indicator (MTI)* y un *Constant False Alarm Rate (CFAR)* manual, que requiere ser actualizado en el mediano y largo plazo.

El desarrollo del proyecto propuesto pretende vincularse a una necesidad de las Fuerzas Armadas para incrementar las capacidades operativas de su defensa aérea, haciendo efectivas la aplicación de políticas y planes para el desarrollo tecnológico en el ámbito de la seguridad nacional y protección de puntos estratégicos de alto interés económico, aumentando la eficiencia y la efectividad de respuesta del sistema de defensa aérea en situaciones de riesgo que requieran atención y reacción inmediata.

Se utilizará una investigación exploratoria en el estudio y análisis de técnicas Rayleigh y Weibull CFAR aplicadas a los procesadores de señales de radar MTI como se indica en el capítulo 2.

En segundo lugar, una investigación descriptiva se empleará tanto para la implementación de los algoritmos de procesamiento basados en técnicas bayesianas, así como para analizar y

comparar el desempeño de los procesadores de radar correspondientes como se indica en el capítulo 3.

En tercer lugar, la implementación en tiempo no real de los procesadores bayesianos en el radar de vigilancia del sistema OERLIKON obedecerá a una investigación descriptiva y explicativa que garantice la obtención de los indicadores propuestos como se muestra en el capítulo 4.

Finalmente se llega a las conclusiones y recomendaciones que se muestran en el capítulo 5, que a través de los capítulos 3 y 4 demuestran la funcionalidad de los procesadores y equipos utilizados para la realización de este proyecto de investigación.

## **1.2 Justificación e Importancia**

El proyecto general busca generar una solución tecnológica endógena para que los sistemas *OERLIKON* puedan ser modernizados a un bajo costo y operarlos con mayor confiabilidad al presentar los resultados en una pantalla digital a diferencia de la pantalla actual de tubo de rayos catódicos desgastada, desarrollando procesadores de radar con alta Probabilidad de Detección, para una Probabilidad de Falsa Alarma Constante y relaciones señal (*target*) a interferencias (*clutter* + ruido blanco) alrededor o superiores a los 6 dB.

Los principales problemas que se presentan a la hora de modernizar sistemas de radar de la defensa aérea ya existentes son: altos costos de los existentes y de alta reserva (*i.e.*, en la mayoría propietarios), así como también la deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción. Contrariamente los sistemas que se desarrollan en base a la investigación científica aplicada pueden subsanar estos inconvenientes con costos muy reducidos y con garantía de una transferencia de tecnología real dentro de todos los procesos de implementación. Por lo tanto, el proyecto planteado a través de sus componentes expuestos en el Resumen del Programa,

superan estas dificultades ya que la investigación y desarrollo de los procesadores generan soluciones tecnológicas soberanas y propietarias en el ámbito general de vigilancia y seguridad nacional.

Por lo que para el desarrollo de este proyecto es fundamental e indispensable la realización de una investigación previa respecto a los principios básicos, al análisis de las técnicas avanzadas CFAR y su implementación; de esta manera se podrá obtener el conocimiento necesario para lograr un avance en el proyecto total, y se conocerá el funcionamiento y características del tema investigado.

### **1.3 Alcance del Proyecto**

El plan de trabajo estará en torno al cumplimiento casi secuencial de los objetivos específicos y se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Realizar un estudio exhaustivo y analítico del estado del arte en relación a los procesadores de señales con sistemas Rayleigh y Weibull CFAR.
2. Generación de un sistema de simulación de señales de radar controlado que permita en cualquier momento conocer la relación señal / interferencia y poder obtener las curvas operacionales del receptor (*ROC*) del proceso bajo estudio.
3. Evaluación del procesador MTI en cascada con los procesadores Rayleigh y Weibull CFAR y propuestas de estrategias de aprendizaje en el ambiente radar, así como comparar con el procesador MTI.
4. Digitalización de las señales I y Q generadas por el radar de vigilancia del sistema OERLIKON.

5. Implementación en tiempo no real, en MATLAB utilizando los toolbox disponibles y prototipo para *OERLIKON*.
6. Elaboración de la documentación del proyecto y presentación de documentos finales.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar un sistema procesador digital de la señal de radar clásico, con alta probabilidad de detección, para una probabilidad de falsa alarma constante (CFAR) del tipo Rayleigh y Weibull, para relaciones señal (*target*) a interferencias (*clutter* + ruido blanco) alrededor o superiores a los 6 dB para el sistema de artillería antiaérea OERLIKON.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos están en relación con el objetivo principal propuesto y formarán parte de cada una de las etapas del desarrollo del presente proyecto. Los objetivos específicos se pueden resumir de la siguiente forma:

- ✚ Realizar el estudio del estado del arte del problema MTI y CFAR Rayleigh y Weibull.
- ✚ Estudiar y analizar las técnicas MTI del sistema OERLIKON y su implementación mejorada en un ambiente de radar con control de la relación señal / interferencia para obtener las curvas operacionales de receptor (*ROC*), agregando los procesadores Rayleigh y Weibull CFAR.
- ✚ Comparar el desempeño de los procesadores implementados con el clásico Moving Target Indicator (MTI).
- ✚ Digitalizar las señales I y Q generadas por el radar de vigilancia del sistema OERLIKON.



- ✚ Implementar en tiempo no real, en MATLAB utilizando los toolbox disponibles para el efecto.

## CAPÍTULO 2

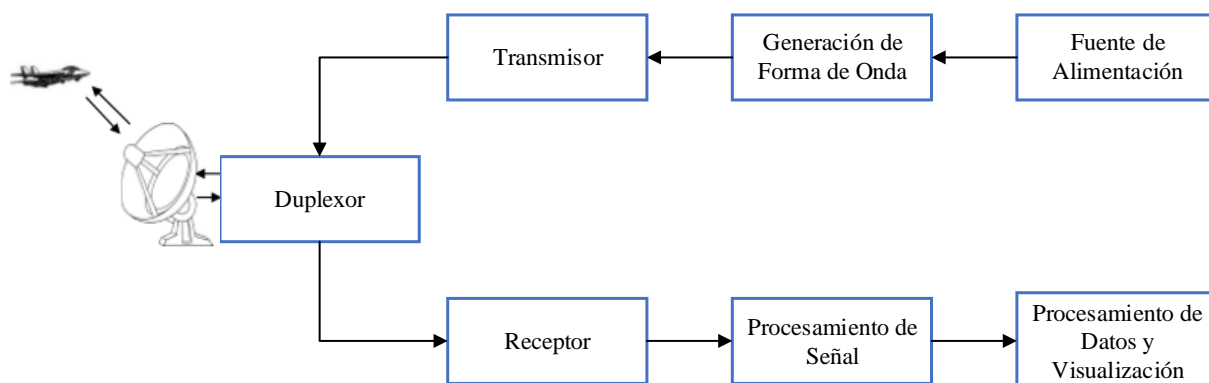
### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 Radar

La palabra radar significa “Detección y medición de distancias por radio” (Radio Detection And Ranging). El radar es un sistema eléctrico que mide distancias, velocidades o direcciones de objetivos de interés, a través del empleo de ondas electromagnéticas para objetos fijos o itinerantes. El sistema de radar opera de la siguiente manera: emite un impulso de radio, éste a su vez se refleja en el objetivo y luego se recibe en la misma posición del emisor. La energía recibida del objetivo se denomina “eco”, la potencia recibida del eco de radar depende de algunos factores los cuales son los siguientes: potencia transmitida, sección transversal de radar y distancia entre el radar y el objetivo.

El objetivo fundamental de un sistema de radar es la detección de blancos en el área que se está trabajando y estimar su posición, la cual se basa en decidir acerca de si un objetivo está presente o no en el medio (aire, mar o tierra). Los sistemas de radar efectúan una detección la cual es de forma automática, esto se lo realiza fijando un umbral de detección en el nivel de la señal recibida.

Existen diversos sistemas de radar, pero los principales contienen transmisor, antena, receptor y procesamiento de señal. En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques básico de un sistema de radar, el cual contiene las partes principales de un radar y facilita su aprendizaje acerca de este sistema (Mohammed B, 2015).



**Figura 1.** Diagrama de bloques básico de un sistema de radar.

Fuente:(Mohammed B, 2015)

Como ya se mencionó anteriormente en el concepto de radar, si la señal de retorno tiene un valor superior al nivel de umbral, el objetivo se manifiesta como presente. Caso contrario, si no supera el nivel de umbral, por lo tanto, no existe ningún objetivo presente (Mohammed B, 2015).

La mayor parte de sistemas de radar actuales son coherentes, lo cual significa que reciben la señal como amplitud y fase. El detector de tipo síncrono, en el receptor de radar, produce componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) de la señal recibida, la fase que representa la parte real y la componente en cuadratura que representa la parte imaginaria.

## 2.2 Clasificación de Distribuciones

En la clasificación de las distribuciones de probabilidad de la amplitud de la señal recibida tenemos las siguientes: Distribuciones Clásicas, Distribuciones de Amplia Aplicación, Distribuciones Reconocidas, Distribuciones en Transición y Distribuciones Poco Usadas. En este trabajo nos enfocaremos principalmente en el primer grupo, que en este caso son las distribuciones clásicas, las cuales son elementales e introducidas a trabajos y artículos de

investigación, ya que desempeñan un papel importante en sus aplicaciones y a la vez han sido obviamente recomendadas por varios autores (Machado Fernández & Bacallao Vidal, 2017).

### **2.2.1 Distribuciones Clásicas**

El estudio de las distribuciones clásicas concluye en que se emplean para modelación de clutter de tipo marino. El clutter acoge formas no-Rayleigh para alta resolución, además se sabe que el modelo Rayleigh tiene sus deficiencias, pero a pesar de ello varios autores experimentan el rechazo de la hipótesis Rayleigh como paso inicial cuando se emplean procedimientos de ajuste. Para la realización de este proyecto nos enfocaremos principalmente en la Distribución Rayleigh y Distribución Weibull.

#### **2.2.1.1 Distribución Rayleigh**

La Distribución de Rayleigh pertenece al grupo de las distribuciones clásicas, ya que de acuerdo al campo de la estadística y probabilidad viene a ser una distribución de función continua. La aplicación de la Distribución de Rayleigh tiene mayor rendimiento para aplicaciones de resolución normal o baja, ya que muestra una discrepancia en aplicaciones que trabajan con amplitud de alta resolución.

La Distribución Rayleigh está enfocada especialmente para clutter de baja resolución, ya que su factor de ajuste es relajado; por otro lado, en la actualidad y para trabajos futuros los sistemas modernos en su mayor parte son de alta resolución (Machado Fernández & Bacallao Vidal, 2017).

La Distribución de Rayleigh, así como posee ventajas, a su vez también posee desventajas como es la insuficiencia de amoldar su forma a resultados variables medidos en experimentos

para condiciones que puedan ser alteradas, esto se debe a que la FDP (Función de Densidad de Probabilidad) es elemental y consta de un solo parámetro.

A continuación, se muestra la respectiva ecuación para la función de densidad de probabilidad para la distribución Rayleigh:

$$f_x(x; \alpha) = \frac{x}{\alpha^2} \exp\left[-\frac{x^2}{2\alpha^2}\right] \quad (1)$$

donde:

$x$  es la amplitud

$\alpha$  es el parámetro de escala y el único de la distribución de Rayleigh

### **2.2.1.2 Distribución de Weibull**

La distribución Weibull ha sido aplicada en varios tipos de clutter, entre ellos tenemos: terrestre, marino, atmosférico y de hielo, además esta distribución también se enfoca en aplicaciones de alta resolución.

Las investigaciones actuales priorizan a la distribución Weibull para modelar mejor el clutter de mar; además la convergencia utilizada para baja resolución para la distribución Rayleigh, es más ligera en la distribución Weibull, esto sucede cuando el valor del parámetro de forma es igual a dos (Machado Fernández & Bacallao Vidal, 2017).

Uno de los beneficios de la distribución Weibull es su facilidad para simular. Las variables de tipo aleatorio Weibull pueden producirse de forma simple, esto a través de un método de inversión. Todas las ventajas de la distribución Weibull hacen de ella un modelo efectivo para aquellas nuevas investigaciones, por ejemplo, la inteligencia artificial. La Función de

Densidad de Probabilidad de Weibull no muestra dificultades y facilita soluciones simples en varias situaciones de sistemas de radar.

A continuación, se tiene la ecuación de la PDF para la distribución Weibull:

$$f_x(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta x^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp \left[ - \left( \frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

donde:

$\alpha$  es el parámetro de escala

$\beta$  es el parámetro de forma

**Tabla 1**

*Comparación de distribuciones que han sido utilizadas para modelar el clutter marino.*

Distribución	Tipo de Clutter	Ajuste	Superioridad	Desarrollos Vinculados a Radar	Relación al Fenómeno Físico
Rayleigh	Baja resolución	Alta	Media	Algunos	Baja
Weibull	Alta resolución y bajo ángulo rasante	Alta	Alta	Muchos	Baja

Fuente: (Machado Fernández & Bacallao Vidal, 2017)

### 2.3 Nivel de Umbral con Detector de Ley Cuadrática

Cuando ya se sabe el tipo de distribución estadística del ruido se puede analizar falsas alarmas. Las falsas alarmas, en otras palabras, son las falsas detecciones que acontecen por las variaciones aleatorias de ruido en las muestras. Se puede evitar las falsas alarmas diseñando el nivel de umbral fijo y basado en la distribución estadística del ruido de fondo (Mohammed B, 2015).

$$T = -\sigma_n^2 \ln(P_{fa}) \quad (3)$$

donde:

$T$  Nivel de umbral

$P_{fa}$  Probabilidad de falsa alarma

$\sigma_n$  Varianza del ruido

## 2.4 Modelos de Destino

Los modelos de destino se refieren a si un objetivo se encuentra presente, entonces la señal que regresa abarcará dos señales, la del objetivo y la del ruido. Los objetivos presentan estructuras complejas, mismos que reflejan dispersores con distintas secciones transversales de radar (RCS) (Mohammed B, 2015).

Peter Swerling introdujo apreciaciones de los modelos de reflexión con el objetivo de escanear datos, además detalló las propiedades estadísticas de la sección transversal de radar (RCS) de los objetivos mediante cinco modelos diferentes. En la Tabla 2 que se muestra a continuación se detalla los tipos de modelo de Swerling para diferentes objetivos y la característica de cada uno respectivamente:

**Tabla 2**  
*Modelos de destino Swerling*

Modelo	Descorrelación	Característica
Swerling 1	Escaneo a Escaneo	Los pulsos que son de retorno no varían de un pulso a otro, esto quiere decir que están correlacionados de forma correcta.
Swerling 2	Pulso a Pulso	Los pulsos de eco no están perfectamente correlacionados, así como de escaneo a escaneo. Estos son distintos entre sí durante el mismo tiempo.
Swerling 3	Escaneo a Escaneo	Los objetivos poseen un dispersor dominante, para ello se utiliza una distribución de cuarto grado de tipo chi-cuadrado ya que nos favorece para modelar los pulsos de retorno.
Swerling 4	Pulso a Pulso	Las superioridades de eco no son corregidas; por otro lado, los pulsos aleatorios del eco imperativo de varios objetivos se detallan como una distribución de cuarto grado de tipo Chi-cuadrado.
Swerling 5/0	Siempre correlacionado	Los ecos son constantes y correlacionados de manera perfecta de pulso a pulso y de escaneo a escaneo.

Fuente: (Mohammed B, 2015)

Para llevar a cabo nuestro trabajo de investigación se utilizó específicamente el modelo Swerling 5/0 gracias a sus características y desempeño en investigaciones que verifican su funcionalidad y rendimiento.

## **2.5 Clutter Marítimo**

Primero se debe entender lo que es “clutter”, el cual es la consecuencia de un rebote de la emisión del sistema de radar en el fondo dónde está incluido el objetivo. Existen diversos fondos encontrados en aplicaciones, entre ellos tenemos el clutter marino y el clutter terrestre o clutter de tierra, entre otros. Específicamente en este trabajo nos enfocaremos en el estudio del clutter marino.

El clutter marino presenta diferencias significativas respecto al clutter terrestre, como lo son los “spikes”, que son la reflexión del clutter y se confunden con blancos. Para ello los sistemas de radar que trabajan en el ambiente marítimo poseen una limitación en su ejecución obligada por ecos no deseados. Para ello se utilizó el modelo de Weibull ya que nos permite corregir estos inconvenientes respecto a la diferenciación entre fondo (clutter) y blanco (Machado Fernández & Bacallao Vidal, 2017).

El clutter marino posee un coeficiente de retrodispersión que lo provoca las olas del mar y éste a su vez es mínimo respecto al terrestre; además se encuentra picos seguidos de ruido del mar. Cuando se tiene un largo tiempo de correlación, el clutter marino no puede suprimirse a través de una integración de tipo no coherente (Sekine & Yuhai, 1990).

El operador de radar tiene una tarea difícil en un entorno marítimo en el momento de diferenciar entre la reflexión de algún objetivo y aquellas reflexiones de la superficie del mar.

El clutter marítimo genera una reflexión difusa debido a la dispersión o a su vez llamada



retrodispersión la cual regresa de la superficie del mar siendo iluminada por pulsos de radar (Mohammed B, 2015). Los ecos creados por el clutter marítimo comúnmente no son de tipo Gaussiano, en forma particular si existe presencia de olas, viento u otros factores del mar. La diversidad de comportamientos de los reflejos que existen en la naturaleza del mar, obstaculiza modelar el clutter marítimo y a su vez la detección de objetivos.

## 2.6 Probabilidad de Detección

Este tipo de probabilidad tiene el propósito de detectar de forma satisfactoria algún objetivo; además es capaz de cuantificar la relación entre los blancos que se localizan y los que pasan desapercibidos. Cuando un objetivo es detectado correctamente, se crea por lo menos una detección encima del área en la cual existe un nivel muy significativo de señal de objetivo. Para calcular la probabilidad de detección se lo hace mediante la razón entre el número de veces en que se detectó un objetivo y el número total de objetivos (Habana, 2017).

$$P_d = \frac{\text{Número de objetivos intentados}}{\text{Número de total de objetivos}} \quad (4)$$

## 2.7 Probabilidad de Falsa Alarma

Es la probabilidad de que se genere una falsa detección en alguna celda dada; además es capaz de medir la proporción entre las muestras de clutter que son catalogadas de manera errónea como blanco y aquellas que son adecuadamente excluidas por pertenecer al fondo. Para calcular la probabilidad de falsa alarma se lo hace mediante la razón entre el número de detecciones falsas generadas sobre una celda y el número de repeticiones del experimento (Habana, 2017). Para este trabajo se estableció valores constantes de probabilidad de falsa alarma entre los cuales tenemos:  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$ .

## **2.8 Conceptos de Tasa de falsa alarma constante (CFAR)**

### **2.8.1 Introducción**

En un clutter de entorno real, los parámetros del ruido y potencia son procedimientos inciertos que son no estacionarios y varían en función del tiempo. Para ello es fundamental la aplicación de un valor de umbral fijo en datos verdaderos lo cual ocasionará una mayor cifra de falsas alarmas. Por lo tanto, no logrará cumplir con la probabilidad de falsa alarma deseada.

A continuación, se estudiarán los detectores de falsa alarma constante (CFAR), los cuales tienen el objetivo de mantener la probabilidad de falsa alarma del ruido de fondo o clutter a un valor de nivel fijo. El CFAR aprecia el nivel de potencia de fondo de cada una de las muestras próximas para crear un valor de umbral de detección que cambie de forma y que se adapte al nivel de potencia del ruido del clutter.

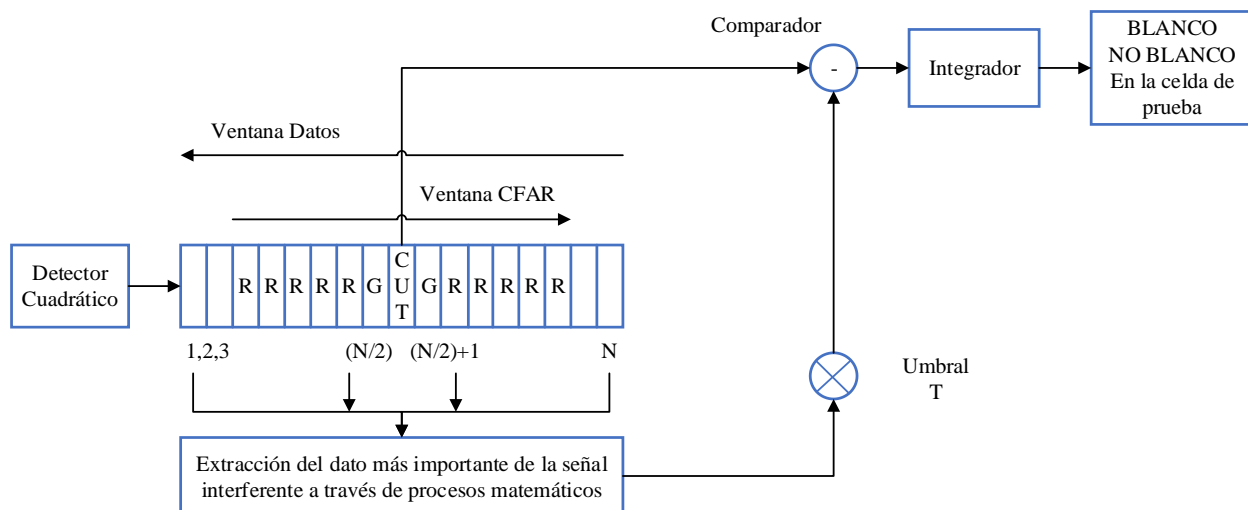
Los entornos que son de tipo heterogéneo, así como los cambios de clutter y los objetivos múltiples son aquellos ambientes en que pueden trabajar los detectores CFAR y todavía sostener la probabilidad de falsa alarma (Mohammed B, 2015). A continuación, se han identificado y se estudiará cuatro tipos de procesadores, los cuales serán utilizados en nuestro trabajo y son los siguientes:

- Promedio de celdas CFAR (CA-CFAR)
- Mayor promedio de celdas CFAR (GOCA-CFAR)
- Menor promedio de celdas CFAR (SOCA-CFAR)
- Estadísticas ordenadas CFAR (OS-CFAR)

## 2.8.2 Arquitectura CFAR

En la arquitectura CFAR se muestra cuatro parámetros los cuales son los siguientes: celda bajo prueba (CUT), celdas de guarda (G), celdas de referencia (R) y multiplicador CFAR ( $\alpha$ ). Estos parámetros antes mencionados fortalecen a dicho procesador a determinar un valor de umbral variable y que además “trackee” permanentemente las variaciones temporales del ruido de fondo o clutter (Mohammed B, 2015).

La Figura 2 que se muestra a continuación indica una sola dimensión de la arquitectura CFAR la cual se emplea en la dirección del rango.



**Figura 2.** Diagrama general de procesador CFAR.  
Fuente: (Elias & Puga, 1989)

La celda llamada CUT está en el centro del procesador y es aquel lugar dónde se utilizará el valor de umbral. Si el objetivo se encuentra en la celda CUT, lo que se debe efectuar es comparar el valor de la celda CUT con el umbral y en el caso de que exceda se obtiene una detección.

También se encuentran las celdas de guarda denominadas con la letra “G”, aquellas se encuentran a ambos lados de la celda CUT y suministra una máxima estimación del ruido de fondo, como se muestra en la Figura 2. El propósito de tener dichas celdas es suprimir algún exceso del objetivo en el caso de que el objetivo llegue a dispersarse más de una muestra (más de una celda de resolución).

Por otro lado, tenemos las celdas de referencia y se las denomina con la letra “R”, aquellas se encargan de apreciar el umbral del ruido de fondo; cabe recalcar que mientras más muestras de ruido de fondo exista en las celdas de referencia (tampoco un número demasiado grande), entonces será mejor la apreciación del umbral.

El factor multiplicador CFAR es constante y se denomina con el símbolo “ $\alpha$ ”, este se lo puede deducir en función de la probabilidad de falsa alarma que se desee para obtener el valor de umbral de las celdas de referencia en el nivel adecuado.

El funcionamiento de la Figura 2 para los detectores CFAR, es aquel en el que la ventana se moviliza a través de los datos. Cuando la ventana se traslada a través de una muestra de señal y ésta a su vez estima el término medio de umbral, esto se lo realiza mediante el empleo de las muestras en las celdas que son de referencia. Por último, el dicho umbral promedio que se pudo apreciar se multiplica por la constante CFAR para generar el dato real del umbral. En ese instante ese valor es comparado con la celda bajo prueba y así poder determinar si el objetivo se encuentra o no presente (Mohammed B, 2015).

### **2.8.3 Detectores CFAR**

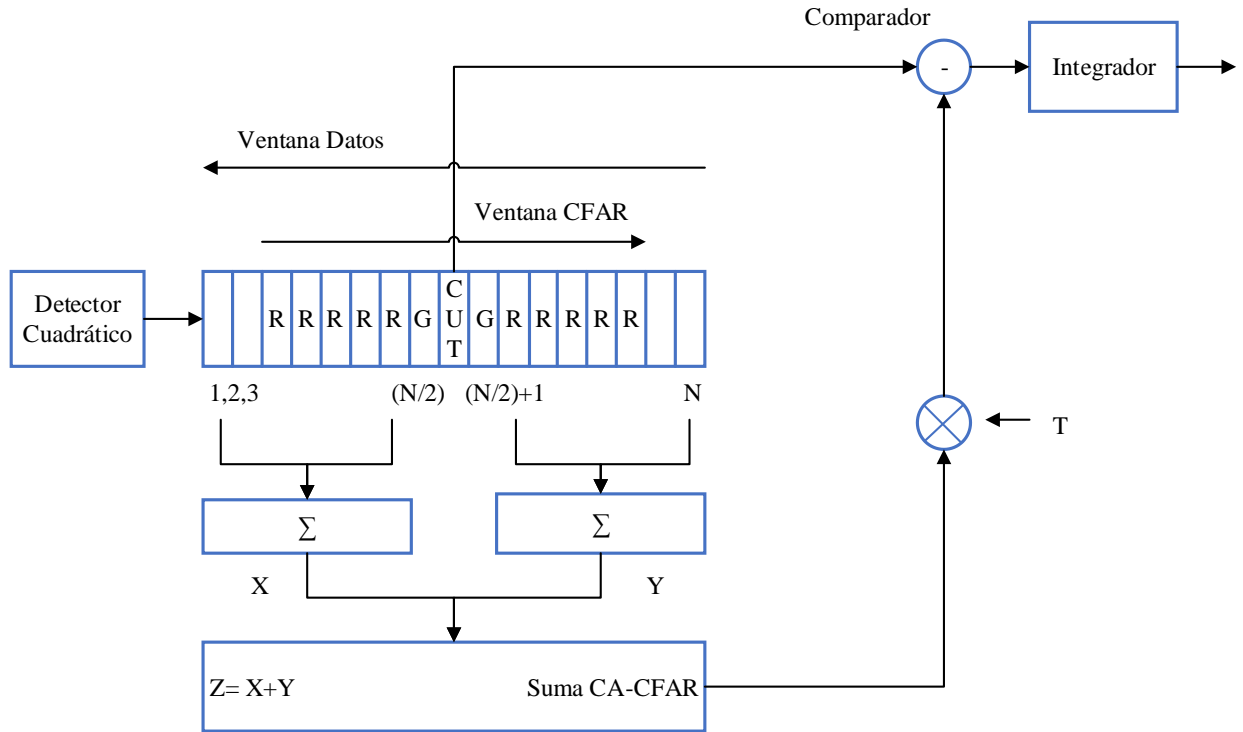
A continuación, se describirá de forma precisa y detallada los cuatro tipos de procesadores CFAR estándar que se mencionó anteriormente en este capítulo.

### **2.8.3.1 Detector CFAR de Promedio de Celdas (CA-CFAR)**

El funcionamiento del detector CFAR de promedio de celdas, es poder estimar con las muestras que están comprendidas en las celdas de referencia y para ello se las debe promediar. Para sustentar la probabilidad de falsa alarma constante que se desee, se debe insertar un nivel de umbral que se requiera, esto se lo obtiene mediante el producto del promedio de las celdas de referencia con una constante CFAR. El detector CA-CFAR se lleva a cabo generalmente en ambientes homogéneos en donde las celdas de referencia comprenden muestras autónomas y distribuidas de forma equitativa; además el objetivo está inserto en la celda CUT (Mohammed B, 2015).

#### **2.8.3.1.1 Arquitectura del detector CFAR de promedio de celdas (CA-CFAR)**

En la arquitectura del detector CA-CFAR se efectúa el promedio de las muestras primordiales y distanciadas como se puede apreciar en la Figura 3. La letra “R” representa las muestras comprendidas en las celdas de referencia, la letra “G” representa las muestras comprendidas en las celdas de guarda, “CUT” es la comprendida en la celda de prueba y “N” es el número de celdas de referencia de los dos lados (Mohammed B, 2015).



**Figura 3.** Arquitectura de procesador CFAR de Promedio de Celdas.  
Fuente: (Elias & Puga, 1989)

La fórmula utilizada para un entorno homogéneo y obtener la constante CFAR denominada " $\alpha$ " para CA-CFAR es la siguiente (Mohammed B, 2015):

$$\alpha = N [P_{FA}^{-1/N} - 1] \quad (5)$$

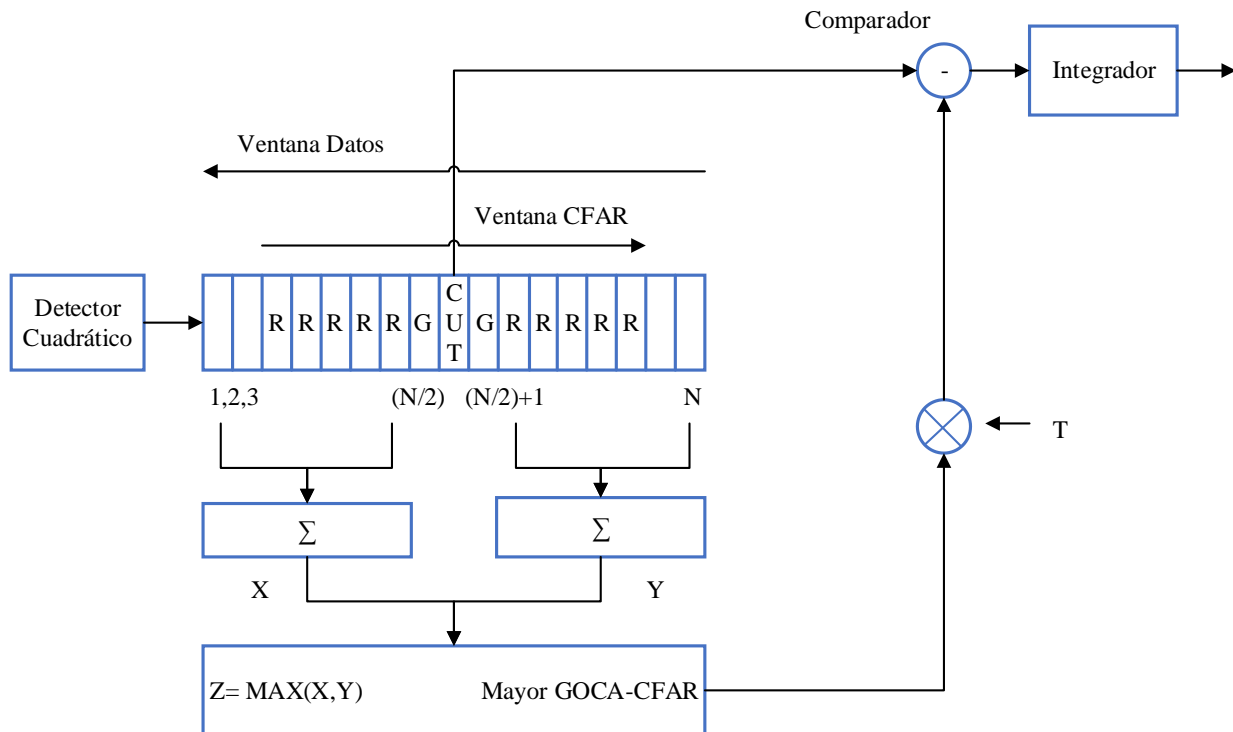
### 2.8.3.2 Detector CFAR de mayor promedio de celdas (GOCA-CFAR)

El detector CFAR de mayor es utilizado para que la probabilidad de falsa alarma permanezca en una zona de borde de clutter (Mohammed B, 2015). La zona de borde de clutter es cuando el radar se encuentra alumbrando una zona como por ejemplo la costa, en donde la reflectividad del mar baja con respecto a la reflectividad de la superficie (playa o tierra).

### 2.8.3.2.1 Arquitectura del detector CFAR de mayor promedio de celdas (GOCA-CFAR)

El detector GOCA-CFAR obtiene el valor de la potencia de ruido promedio de los dos lados de la celda de referencia de forma independiente y después se elige el mayor de ellos. La

Figura 4 muestra la arquitectura del GOCA-CFAR.



**Figura 4.** Arquitectura de procesador CFAR de mayor promedio de celdas.

Fuente: (Elias & Puga, 1989)

En esta sección se emplean métodos numéricos los cuales nos ayudan a calcular la constante CFAR en el GOCA-CFAR para una probabilidad de falsa alarma (Mohammed B, 2015).

Como se puede apreciar en la ecuación (6), el número de celdas de referencia que son incluidas

en el cálculo es sólo un lado de celdas de referencia que se denomina  $\frac{N}{2}$ .

$$P_{FA} = 2 \left\{ [1 + \alpha]^{-\frac{N}{2}} - [2 + \alpha]^{-\frac{N}{2}} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \binom{\frac{N}{2} - 1 + k}{k} [2 + \alpha]^{-k} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha = N [P_{FA}^{-1/N} - 1] \quad (7)$$

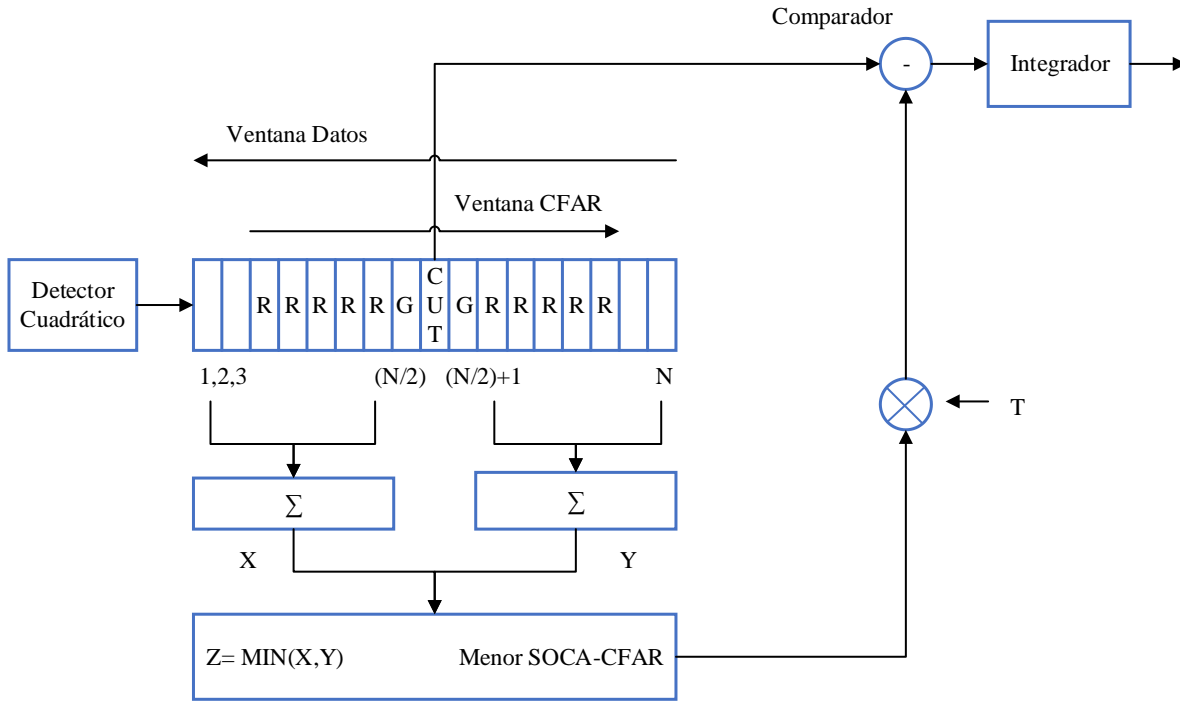
### 2.8.3.3 Detector CFAR de menor promedio de celdas (SOCA-CFAR)

El detector CFAR de menor promedio de celdas se lo emplea para mitigar un efecto conocido como “enmascaramiento objetivo” (Mohammed B, 2015). Este detector trabaja de mejor forma en los entornos donde los objetivos se encuentran estrechamente espaciados.

#### 2.8.3.3.1 Arquitectura del detector CFAR de menor promedio de celdas (SOCA-CFAR)

La arquitectura del detector SOCA-CFAR escoge el lado de menor valor. En el momento que el objetivo se encuentra en la celda llamada “CUT” y a la vez se presenta otro objetivo en las celdas de referencia, dicho detector elimina el objetivo presente en las celdas de referencia y esto se lo realiza mediante la apreciación de las ventanas atrasadas como de las ventanas iniciales, luego elige la apreciación promedio de menor valor entre las dos. En la Figura 5 que se muestra a continuación se puede ver de forma detallada y precisa la arquitectura el detector SOCA-CFAR.





**Figura 5.** Arquitectura de procesador CFAR de menor promedio de celdas.  
Fuente: (Elias & Puga, 1989)

La constante CFAR de SOCA-CFAR se puede obtener mediante la probabilidad de falsa alarma como se describe en la siguiente ecuación (8), (Mohammed B, 2015).

$$P_{FA} = 2[2 + \alpha]^{-\frac{N}{2}} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \binom{\frac{N}{2} - 1 + k}{k} [2 + \alpha]^{-k} \tag{8}$$

$$\alpha = N[P_{FA}^{-1/N} - 1] \tag{9}$$

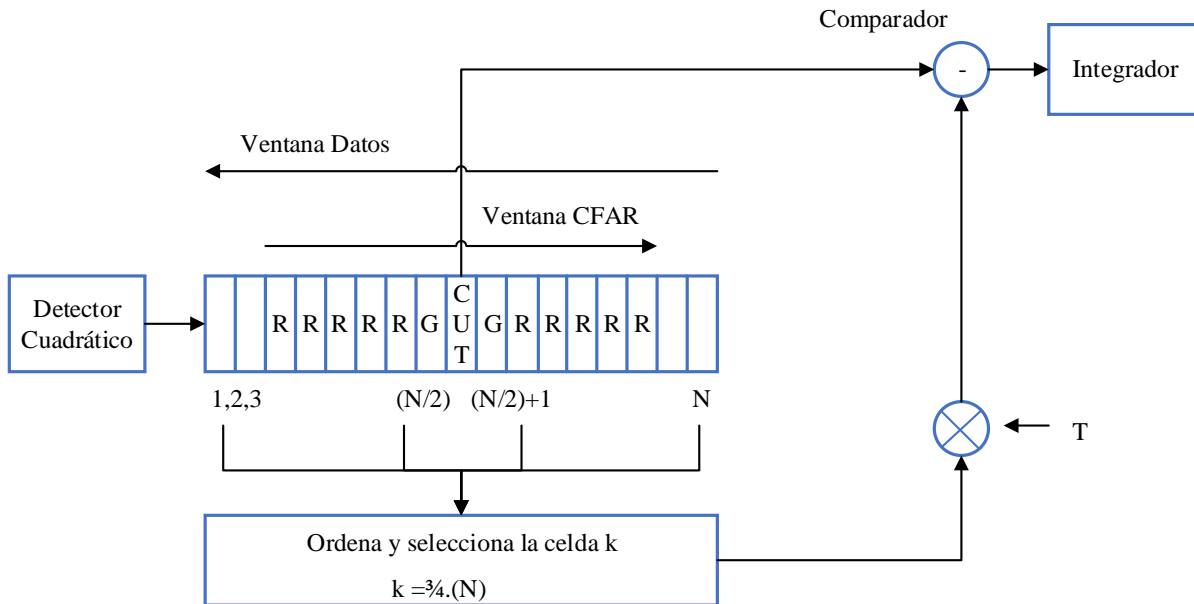
### 2.8.3.4 Detector CFAR de estadísticas de orden (OS-CFAR)

El detector CFAR de estadísticas de orden aprecia el promedio de ruido de fondo mediante una muestra de señal de las celdas de referencia y para ellos se emplea estadísticas de orden.

Este detector es utilizado para superar los inconvenientes con respecto a los detectores anteriores como el auto enmascaramiento, objetivos de enmascaramiento mutuo y desorden de transición (Mohammed B, 2015).

#### 2.8.3.4.1 Arquitectura del detector CFAR de estadísticas de orden (OS-CFAR)

La arquitectura del detector CFAR de estadísticas de orden es apto para zonas heterogéneas. Además, en este detector las muestras en las celdas de referencia se amplían de acuerdo a la potencia, posteriormente se escogen  $k$ -ésimas muestras basadas en estadísticas CFAR para así poder apreciar el umbral medio del entorno. La Figura 6 muestra de forma precisa y detallada la arquitectura del detector CFAR de estadísticas ordenadas.



**Figura 6.** Arquitectura de procesador CFAR de estadísticas ordenadas.  
Fuente: (Elias & Puga, 1989)

La constante CFAR no solo se sujeta al número de celdas de referencia y la probabilidad de falsa alarma, sino que también se sujeta de la elección de la muestra  $k^{th}$ . Para calcular la

constante CFAR se lo hace a través de la probabilidad de falsa alarma como se describe en la ecuación (10).

$$P_{FA} = k \binom{N}{k} \frac{(k-1)! (\alpha + N - k)!}{(\alpha + N)!} \quad (10)$$

## 2.9 Aplicaciones de Procesadores CFAR

Dentro de las aplicaciones de los procesadores CFAR y que en la actualidad se desarrollan en este campo es la implementación en lenguaje VHDL del procesador de promediación (CA-CFAR) adaptado a cambios estadísticos en clutter Weibull. Esta aplicación trata acerca de los inconvenientes que se presentan por la señal de clutter, es por eso que se busca cancelarlos ya que en la actualidad es un problema de los sistemas de radar actuales.

Cuando el procesador CA-CFAR posee una probabilidad de falsa alarma desviada del valor establecido en el diseño, esto se debe a que la alteración estadística del clutter es lenta. Por ello para mejorar este inconveniente se debe corregir el factor de ajuste con estimaciones efectuadas por un método de momentos y expresiones matemáticas.

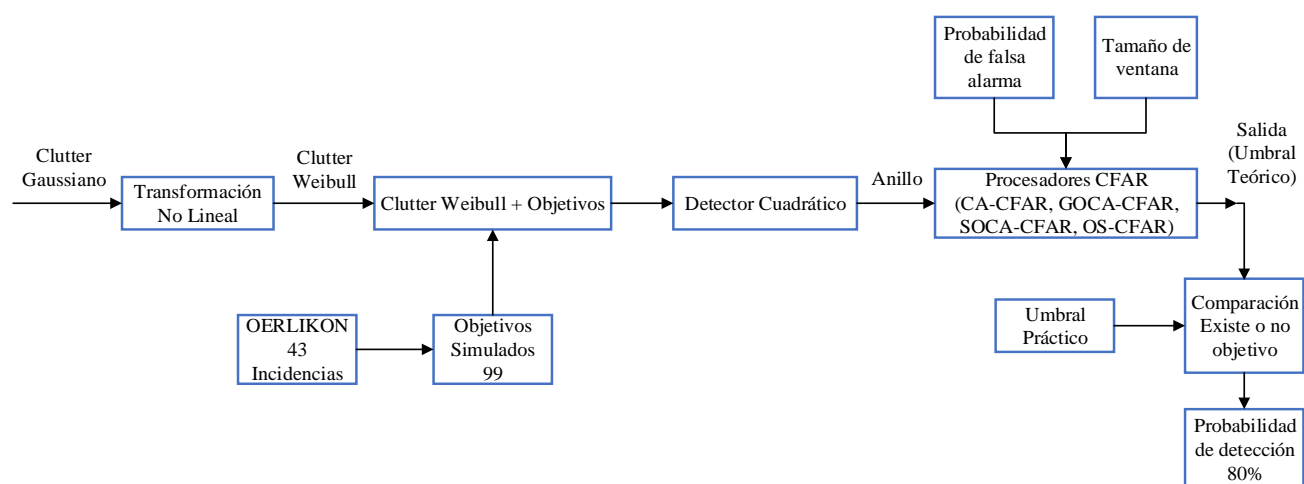
Además, se utiliza la plataforma de MATLAB para que a través del mismo se permita validar los resultados y compararlos con lo que se logró extraer en lenguaje VHDL para así dar lugar a un nuevo detector denominado “W-MoM-CA-CFAR”, que gracias a este detector se logra aportar conceptos y ayuda a mejorar los sistemas de radar. (Raúl et al., 2017)

## CAPÍTULO 3

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

#### 3.1 Diagrama de Bloques de Funcionamiento

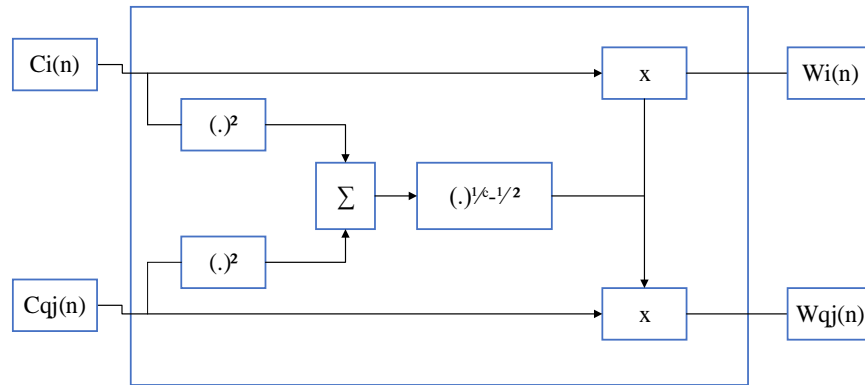
Como se puede observar en la Figura 7 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento de este proyecto, el cual también se lo explicará más adelante mediante fórmulas matemáticas y sus respectivas simulaciones.



**Figura 7.** Diagrama de Bloques de Funcionamiento.  
Fuente: (Propia)

#### 3.2 Generación de Clutter con distribución Weibull

El primer paso fue generar el clutter tipo Gaussiano, luego de ello se procedió a emplear el método de transformación no lineal con el objetivo de efectuar una conversión de clutter tipo Gaussiano a clutter tipo Weibull. Para ello se utilizó el siguiente diagrama de bloques como se puede apreciar en la Figura 8; aquí es indispensable tomar en cuenta que el valor del coeficiente de correlación  $\gamma$  debe ser 0. (Farina, Russo, & Scannapieco, 1987)



**Figura 8.** Transformación no lineal sin memoria.  
Fuente: (León, 1992)

Como se muestra en la Figura 8, está presente la transformación no lineal la cual podemos expresarla mediante la siguiente ecuación matemática.

$$(C_i^2 + C_q^2)^{\frac{1}{c} - 1/2} \quad (11)$$

Después del anterior proceso matemático se obtiene  $W_i$  y  $W_q$ , estos parámetros se muestran en la ecuación 12.

$$W = W_i + jW_q \quad (12)$$

donde:

$W_i$  Señal de clutter tipo Weibull en fase

$W_q$  Señal de clutter tipo Weibull en cuadratura

$W$  señal total de clutter tipo Weibull de valor complejo

Se deduce que el parámetro "c" debe tomar valores de:

- $c = 2$ , cuando el clutter es tipo Rayleigh
- $c = 1.1 - 1.9$ , cuando el clutter es tipo Weibull

- $c = 1$ , cuando el clutter es tipo exponencial

Para la ejecución de este proyecto se empleó el valor del parámetro  $c = 1.2$ , el cual se verificó que en investigaciones actuales pertenece al clutter tipo Weibull más extremo (Sekine & Yuhai, 1990).

### 3.3 Generación de blancos en base al radar OERLIKON

#### 3.3.1 Datos de Radar OERLIKON

En base a trabajos de investigación anteriores (Lara & Ortiz, 2019), se logró obtener los siguientes datos:

- Ancho de haz  $\Phi = 2.4$
- Período de repetición de pulsos de OERLIKON  $T_0 = 1/6400$
- *Apuntador OERLIKON = 6400 milésimas*
- Desplazamiento Angular  $\omega = 60 \text{ rpm}$

Para calcular el número de incidencias con objetivo, se utiliza la siguiente ecuación (13):

$$N_i = \frac{\Phi}{6\omega T_0} \quad (13)$$

Al reemplazar los respectivos valores mencionados anteriormente, obtenemos lo siguiente:

$$N_i = \frac{2.4}{(6)(60) \left( \frac{1}{6400} \right)} \quad (14)$$

$$N_i = 42.67 \approx 43 \text{ incidencias} \quad (15)$$

La ecuación (16), es la ecuación expresada en forma general que se emplea para determinar objetivos en Swerling 0 es:

$$OB = A * e^{-j2\pi * fd * Ni * Tp} \quad (16)$$

donde:

$OB$  Señal de objetivo

Para ello se procede a transformar a fase y cuadratura como se muestran en las siguientes ecuaciones 17 y ecuación 18 respectivamente, además se aplica la transformación de Euler:

$$OB_i = A * \cos(2\pi * fd * Ni * Tp) \quad (17)$$

$$OB_q = -A * \text{sen}(2\pi * fd * Ni * Tp) \quad (18)$$

donde:

$OB_i$  Señal de objetivo en fase

$OB_q$  Señal de objetivo en cuadratura

$N_i$  Número de incidencias con objetivo,  $N_i = [1 - 43]$

$f_d$  Desvío Doppler,  $f_d = [0.0 - 0.5]$  para simulaciones se usará 0.1

$T_p$  Período de muestreo normalizado,  $T_p = 1$

$A$  Módulo de objetivo

Para calcular la potencia de clutter, se utilizó la siguiente ecuación (19):

$$P_c = \frac{\text{var}(W^2)}{|1 + \gamma|^2} \quad (19)$$

donde

$\gamma$  Factor de correlación,  $\gamma = 0$

$P_c$  Potencia de clutter

$W$  Señal total de clutter Weibull

Para calcular el valor de la Potencia del objetivo nos basamos en la ecuación (20) que pertenece a la relación señal clutter ó SCR:

$$SCR = \frac{P_{objetivo}}{P_c} \quad (20)$$

Además, se utilizó la ecuación (21) que pertenece a la Potencia del objetivo:

$$P_{obj} = \frac{A^2}{2} \quad (21)$$

Teniendo como datos la relación señal clutter expresada en dB ó SCR, se procede a utilizar la siguiente ecuación:

$$SCR = 10^{SCR(dB)/10} \quad (22)$$

Al reemplazar las ecuaciones 19, 21 y 22 en 20 se obtiene lo siguiente:

$$A = \sqrt{2 * P_c * 10^{SCR(dB)/10}} \quad (23)$$

### 3.4 Inserción de blancos en clutter Weibull

Después de la señal del objetivo, se obtuvo estos parámetros  $OB_i$  y  $OB_q$ , además para poder insertar la señal de los objetivos en la señal clutter tipo Weibull se realiza la suma como se muestra en las ecuaciones 24 y 25 respectivamente:

$$WO_i = W_i + OB_i \quad (24)$$

$$WO_q = W_q + OB_q \quad (25)$$

donde:

$WO_i$  Señal de objetivo de clutter tipo Weibull en fase

$WO_q$  Señal de objetivo de clutter tipo Weibull en cuadratura



En donde se obtiene la ecuación 26:

$$WO = WOi + jWOq \quad (26)$$

donde:

$WO$  Señal total objetivo de clutter tipo Weibull

Para poder ingresar al procesador CFAR los diferentes valores mencionados anteriormente, en primer lugar, se debe ingresar a un Detector Cuadrático, el cual se lo puede representar mediante la siguiente ecuación matemática 27:

$$S = WOi^2 + WOq^2 \quad (27)$$

donde:

$S$  Señal de salida del Detector Cuadrático

$WOi$  Señal de objetivo de clutter tipo Weibull en fase

$WOq$  Señal de objetivo de clutter tipo Weibull en cuadratura

### 3.5 Parámetros de Procesadores CFAR

Para todos los procesadores de este trabajo se usó celdas de referencia denominadas " $N_{ref}$ " que en este caso significa el tamaño de la ventana a utilizarse, para lo cual se definió diferentes valores de  $N_{ref} = 16$ ,  $N_{ref} = 32$ ,  $N_{ref} = 64$ , además es importante tomar en cuenta que en el centro se encuentra la celda denominada " $CUT$ " que será para evaluar por ejemplo, en el caso que se tenga una ventana de tamaño  $N_{ref} = 32$  celdas se analiza de la siguiente manera: 16 primeras celdas se encuentran en el lado izquierdo de la ventana, en el centro se localizará la celda denominada " $CUT$ ", y luego seguirán en el lado derecho las 16 celdas restantes. Además, se utilizó las celdas de guarda, las cuales permiten mejorar la detección del objetivo.

Es importante mencionar que, para la realización de este trabajo, el desplazamiento de celdas se lo hizo a través del método en forma de anillo y no en range como tradicionalmente se lo ha hecho en otros trabajos.

La probabilidad de falsa alarma es un valor establecido por los estudiantes que están desarrollando este proyecto, para este caso se utilizó diferentes valores de  $P_{fa}$ , en el primer caso comprende cuando  $P_{fa} = 10^{-3}$ , este valor indica que existe una falsa alarma entre 10000 detecciones; el segundo comprende cuando  $P_{fa} = 10^{-4}$ , este valor indica que existe una falsa alarma entre 100000 detecciones; y el tercer caso comprende cuando  $P_{fa} = 10^{-5}$ , este valor indica que existe una falsa alarma entre 1000000 detecciones.

A continuación, se muestra que, para el cálculo de nivel de umbral, se utilizó la siguiente ecuación (28):

$$T = \alpha * m \quad (28)$$

donde:

$T$  Nivel de umbral

$\alpha$  Coeficiente de procesador

$m$  Dato obtenido del procesador CFAR

Para el cálculo del coeficiente del procesador en los diferentes casos: CA-CFAR, SOCA-CFAR y GOCA-CFAR se utilizó la siguiente ecuación (29)

$$\alpha = N_{ref} * \left( P_{fa}^{-\frac{1}{N_{ref}}} - 1 \right) \quad (29)$$

Cabe mencionar que en el programa se reemplazó los valores del tamaño de celda que son los siguientes:  $N_{ref} = 16$ ,  $N_{ref} = 32$  y  $N_{ref} = 64$  y para la probabilidad de falsa alarma se reemplazó los siguientes valores:  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$

En el caso del procesador OS-CFAR, para el cálculo del coeficiente se utilizó la siguiente ecuación (30):

$$P_{fa} = k \binom{N_{ref}}{k} \frac{(k-1)! (\alpha + N_{ref} - k)!}{(\alpha + N_{ref})!} \quad (30)$$

Siendo  $k$  el selector de dato de la ventana  $N$

$$k = \frac{3}{4} N_{ref} \quad (31)$$

Después se despeja  $\alpha$  a través de métodos numéricos y se obtiene el coeficiente del procesador.

En la tabla 3, se detalla los valores de  $m$  para los diferentes procesadores:

**Tabla 3**  
*Valores de  $m$  para los diferentes procesadores*

Tipo de Procesador	Dato obtenido del procesador CFAR
CA-CFAR	$m = X + Y$
GO-CFAR	$m = \max(X + Y)$
SO-CFAR	$m = \min(X + Y)$
OS-CFAR	$m = M(k)$

### **3.6 Digitalización de Señales de Radar**

En la etapa de digitalización de señales de radar se recomienda utilizar el osciloscopio digital TEKTRONIX MSO 4104 de la serie MSO4000 y DPO4000. Procedemos a digitalizar las señales en fase (I) y en cuadratura (Q), la señal la digitalizaremos por un tiempo de 4 segundos y será una onda cuadrada. A continuación, se detalla las características principales del equipo y además se presenta las respectivas indicaciones sobre cómo utilizar el equipo para guardar formas de onda desplegadas en pantalla a una memoria USB (Tektronix Inc., 2004).

#### **3.6.1 Características del equipo TEKTRONIX MSO 4104**

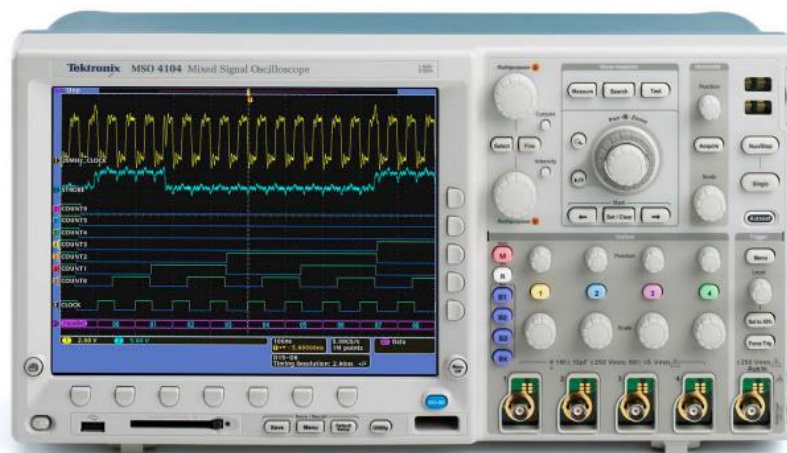
- Modelos de Ancho de Banda 1 GHz, 500 MHz, 350 MHz.
- 4 entradas de Canales Analógicos.
- 16 bits/muestra (Serie MSO).
- Velocidad de muestreo de hasta 5 GS/s en todos los canales.
- Longitud de registro de 10 megapuntos en todos los canales.
- Velocidad de captura de forma de onda máxima >50 000 wfm/s.
- Conjunto de activadores avanzados.

#### **3.6.2 Indicaciones para guardar forma de onda en una USB**

- Insertar la memoria USB en la ranura destinada para esta función, la cual está ubicada en la esquina inferior izquierda del osciloscopio.
- Presionar el botón de “MENÚ” y a continuación se despliega en la pantalla un submenú, se debe presionar el botón “Guardar Forma de Onda”.
- Al presionar el botón de “Guardar Forma de Onda” aparece otro submenú al lado derecho de la pantalla del osciloscopio, seleccionar el botón “Fuente” y enseguida aparecerá las

opciones de canal 1 o canal 2 o ambos, los cuales se pueden variar con el botón de “Multipropósito” y se deberá elegir el canal de acuerdo al criterio del usuario (ambos en este caso para digitalizar I y Q simultáneamente).

- Seleccionar el botón “Destino”, este indica el lugar a donde se desea guardar la forma de onda y en que formato, escoger “Archivo de Hoja de Cálculo (csv)” para que se puedan leer los datos en su computador con mayor facilidad, caso contrario si el usuario desea guardar en otro formato se debe variar con el botón de “Multipropósito”.
- Elegir el botón que indica “Guardar” y enseguida se desplegará una pantalla en el osciloscopio indicando el lugar y con qué nombre desea guardar la forma de onda.
- Una vez que se está conforme con esta información, presionar el mismo botón que se seleccionó anteriormente “Guardar”, y enseguida el osciloscopio empezará a guardar el archivo.



**Figura 9.** Oscilador de señal mixta TEKTRONIX MSO 4104.  
Fuente: (Tektronix Inc., 2004)

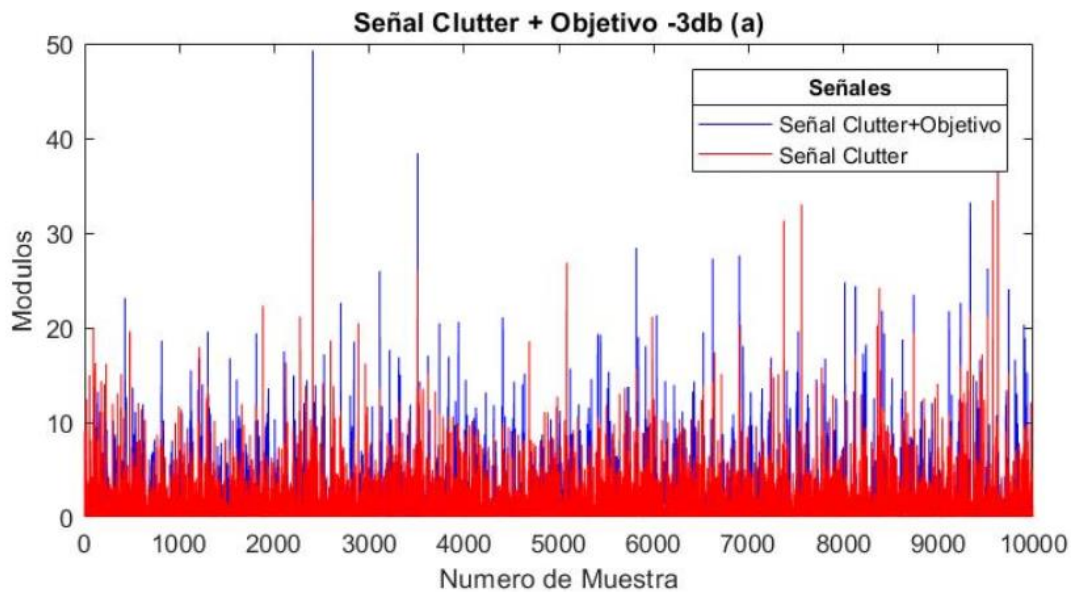
La propuesta del sistema de digitalización evita el uso de tarjetas de adquisición costosas para las etapas de diagnóstico, desarrollo y evaluación de procesadores de radar propios del CICTE.

## CAPÍTULO 4

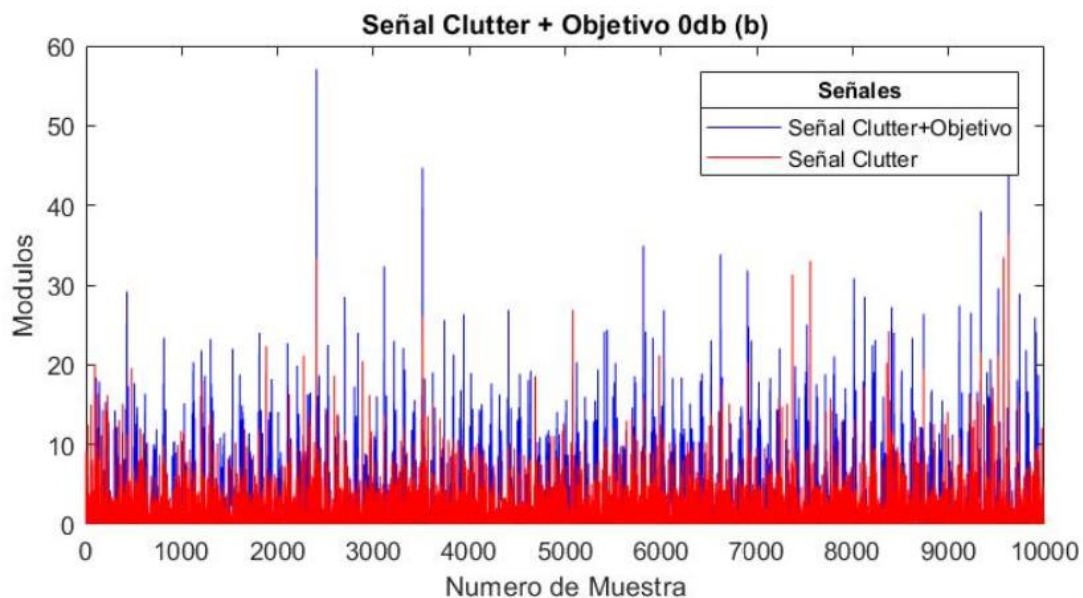
### 4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

#### 4.1. Simulación de señal de clutter Weibull con Objetivos

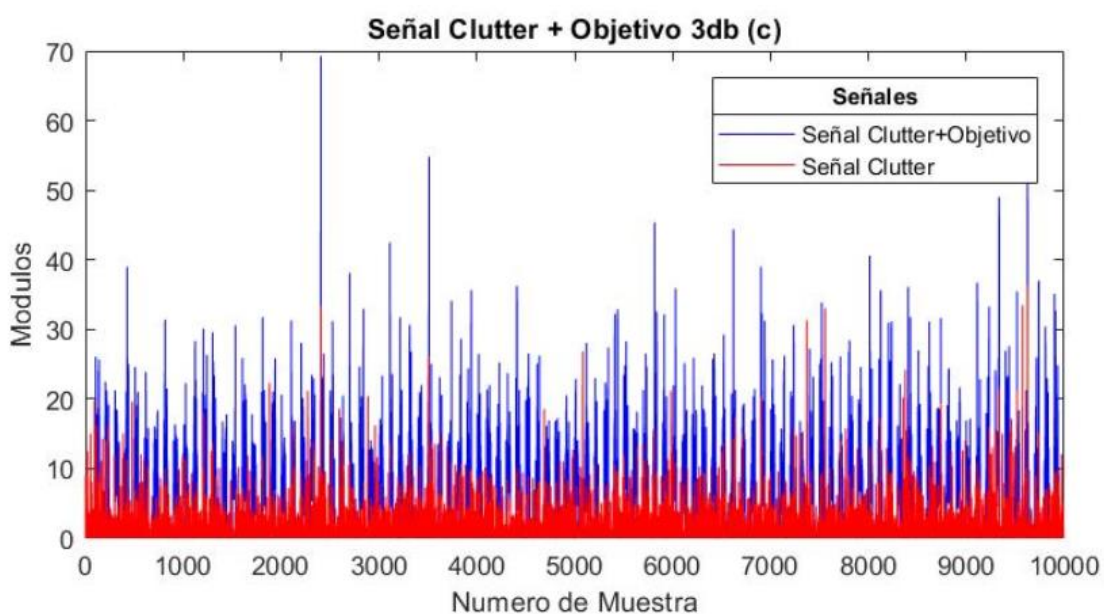
Una vez implementado el programa se procede a hacer una comparación entre la señal del clutter tipo Weibull con la señal del objetivo insertado en el clutter tipo Weibull, luego del detector cuadrático. En la Figuras 10, 11 y 12 se puede observar que cuando hay una relación señal clutter “SCR” con valores de -3 dB, 0 dB y 3dB respectivamente, no se logra diferenciar donde se encuentra el objetivo.



**Figura 10.** Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=-3dB.

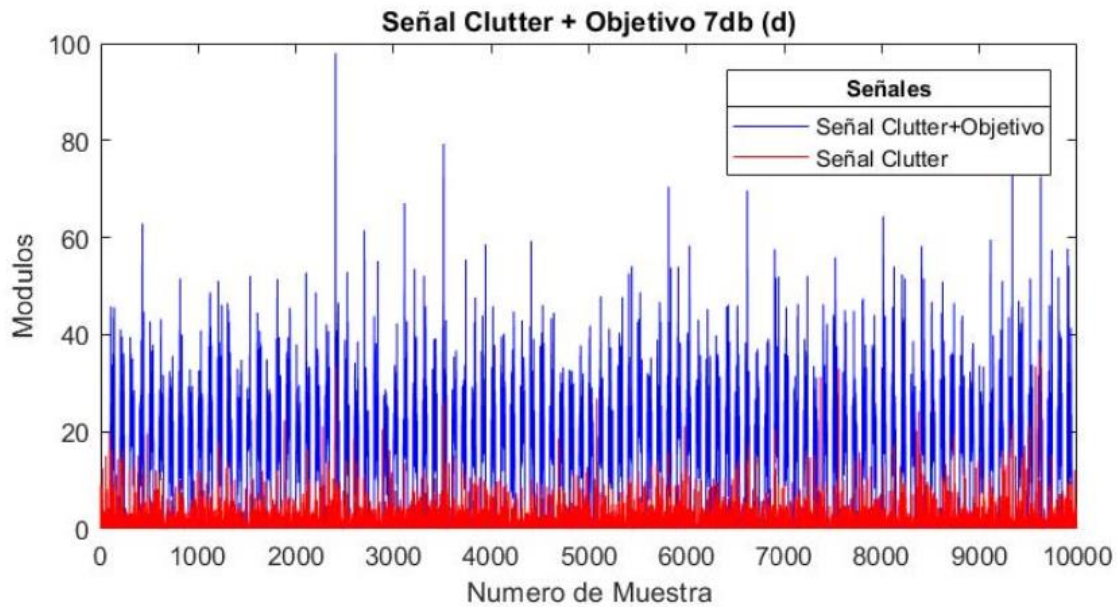


**Figura 11.** Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=0dB.



**Figura 12.** Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=3dB.

En la Figura 13 con valor de la relación señal clutter “SCR” de 7 dB su respectiva gráfica muestra con más claridad la presencia del objetivo.



**Figura 13.** Señal clutter vs Señal clutter + Objetivo, SCR=7dB.

#### 4.2 Entradas y Salidas de procesador CFAR (Umbrales de detección)

Se realizó la comparación entre la entrada al procesador CFAR y el umbral teórico del procesador CFAR; además se debe tener en cuenta que para el cálculo del coeficiente del procesador se utilizó el mismo para todos los procesadores como: CA-CFAR, GOCA-CFAR y SOCA-CFAR, conforme se ilustra en la Tabla 4.

**Tabla 4**

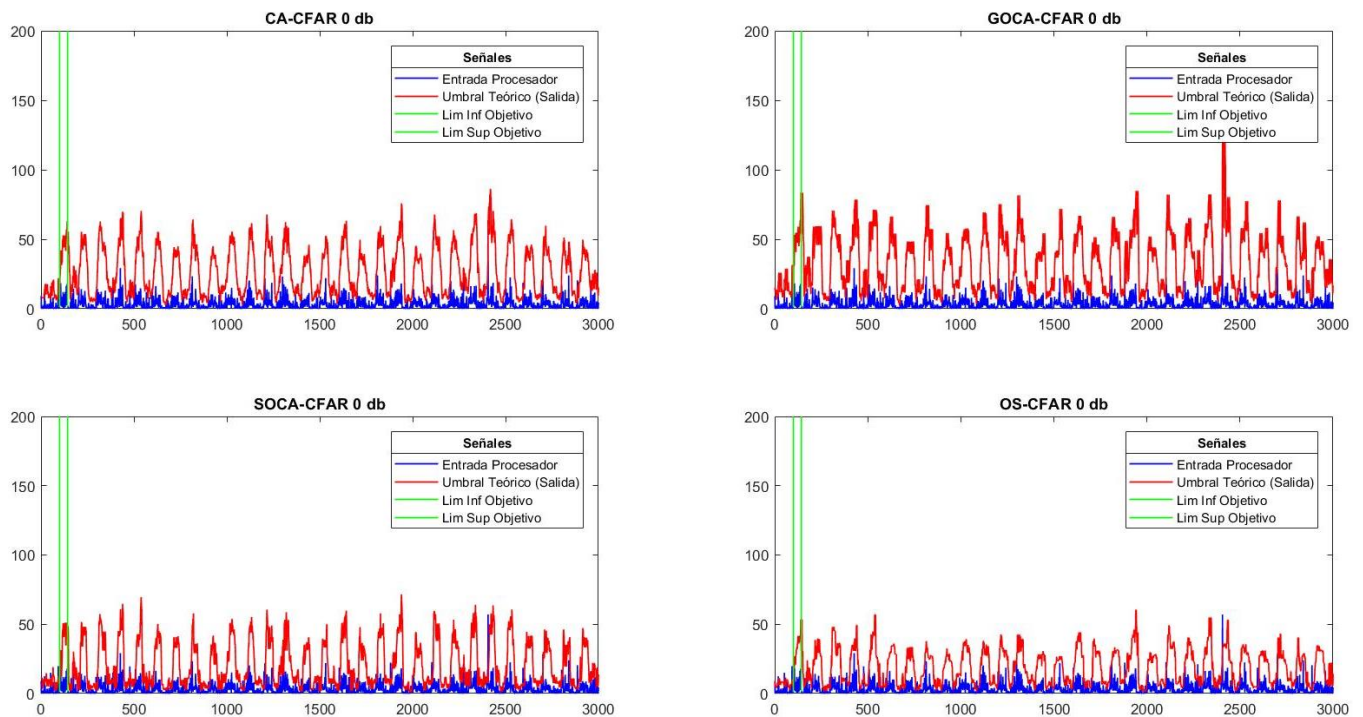
*Valores iniciales para el cálculo de umbrales y probabilidad de detección.*

Probabilidad de falsa alarma	$P_{fa}$	Muestras	$\frac{10}{P_{fa}}$	Objetivos	Muestra espacio entre objetivos
$10^{-3}$		10000		99	100
$10^{-4}$		100000		99	1000
$10^{-5}$		1000000		99	10000

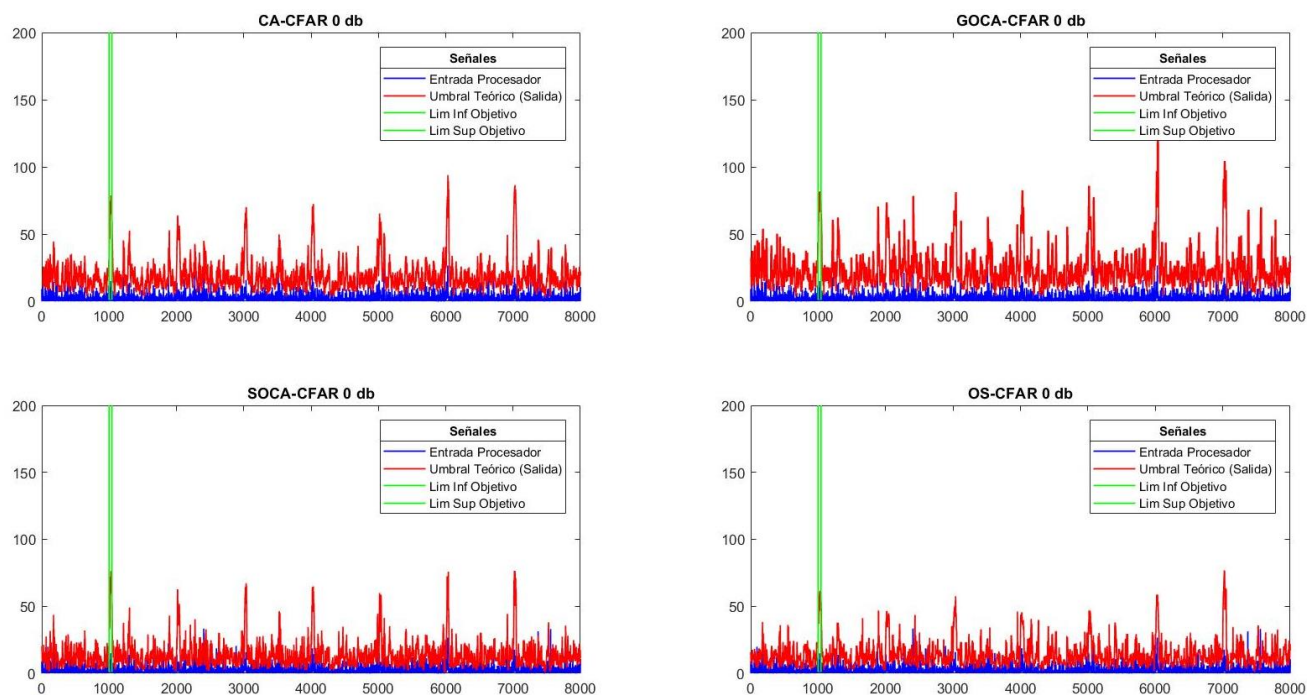


En las Figuras 14, 15 y 16 se analiza con una relación señal clutter de valor  $SCR = 0 \text{ dB}$  y se varía la Probabilidad de falsa alarma para la cual asignamos los siguientes valores de  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$ , para los procesadores: CA-CFAR, GOCA-CFAR, SOCA-CFAR, OS-CFAR. Además, cabe mencionar que dichos procesadores están especialmente diseñados para la detección de objetivos con valor de 3 dB en adelante.

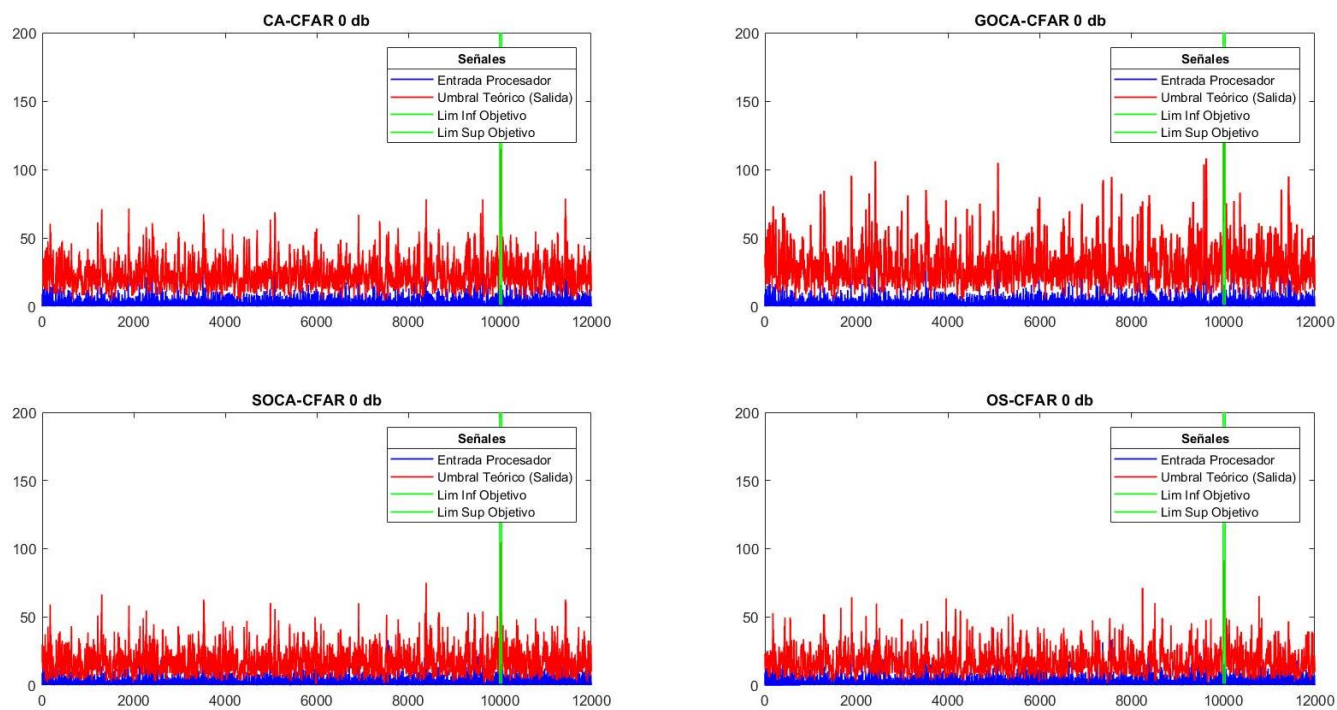
Con los datos obtenidos se lleva a cabo la simulación y obtención de las gráficas con una ventana inicial de  $N_{ref} = 64$  muestras



**Figura 14.** Entrada de Procesador CFAR vs Umbral Teórico,  $P_{fa}=10^{-3}$ .



*Figura 15.* Entrada de Procesador CFAR vs Umbral Teórico,  $P_{fa}=10^{-4}$ .



*Figura 16.* Entrada de Procesador CFAR vs Umbral Teórico,  $P_{fa}=10^{-5}$ .

Como se puede observar en las anteriores Figuras 14, 15 y 16, el umbral teórico hace que sean más visibles los objetivos. En el umbral teórico o salida del procesador se separa las muestras en las cuales existe objetivo y en las cuales no existe objetivo, luego se selecciona el valor máximo en las muestras que no existe objetivo y dicho valor será el umbral práctico constante.

Para tomar una decisión de la existencia de un objetivo, se debe comparar el umbral teórico o salida del procesador con respecto al umbral práctico; en las Tablas 5, 6 y 7 se muestran los umbrales de detección prácticos para diferentes valores de probabilidad de falsa alarma  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$ .

**Tabla 5**  
*Umbrales de detección prácticos ( $T_p$ ),  $P_{fa} = 10^{-3}$ .*

<b>Ventana</b>	<b>Clutter CA-CFAR UmbralCA</b>	<b>Clutter SOCA-CFAR UmbralSO</b>	<b>Clutter GOCA- CFAR UmbralGO</b>	<b>Clutter OS-CFAR UmbralOS</b>	<b>Clutter Señal Entrada</b>
$N_{ref} = 64$	41.58	36.37	63.46	85.77	33.46
$N_{ref} = 32$	40.86	35.40	65.33	87.60	33.46
$N_{ref} = 16$	42.24	30.25	60.52	33.74	33.46

**Tabla 6**

Umbrales de detección prácticos ( $T_p$ ),  $P_{fa} = 10^{-4}$ .

Ventana	Clutter CA-CFAR UmbralCA	Clutter SOCA- CFAR UmbralSO	Clutter GOCA- CFAR UmbralGO	Clutter OS-CFAR UmbralOS	Clutter Señal Entrada
$N_{ref} = 64$	53.46	51.47	77.90	79.88	63.75
$N_{ref} = 32$	64.53	40.88	112.44	78.83	63.75
$N_{ref} = 16$	75.40	55.38	128.04	66.65	63.75

**Tabla 7**

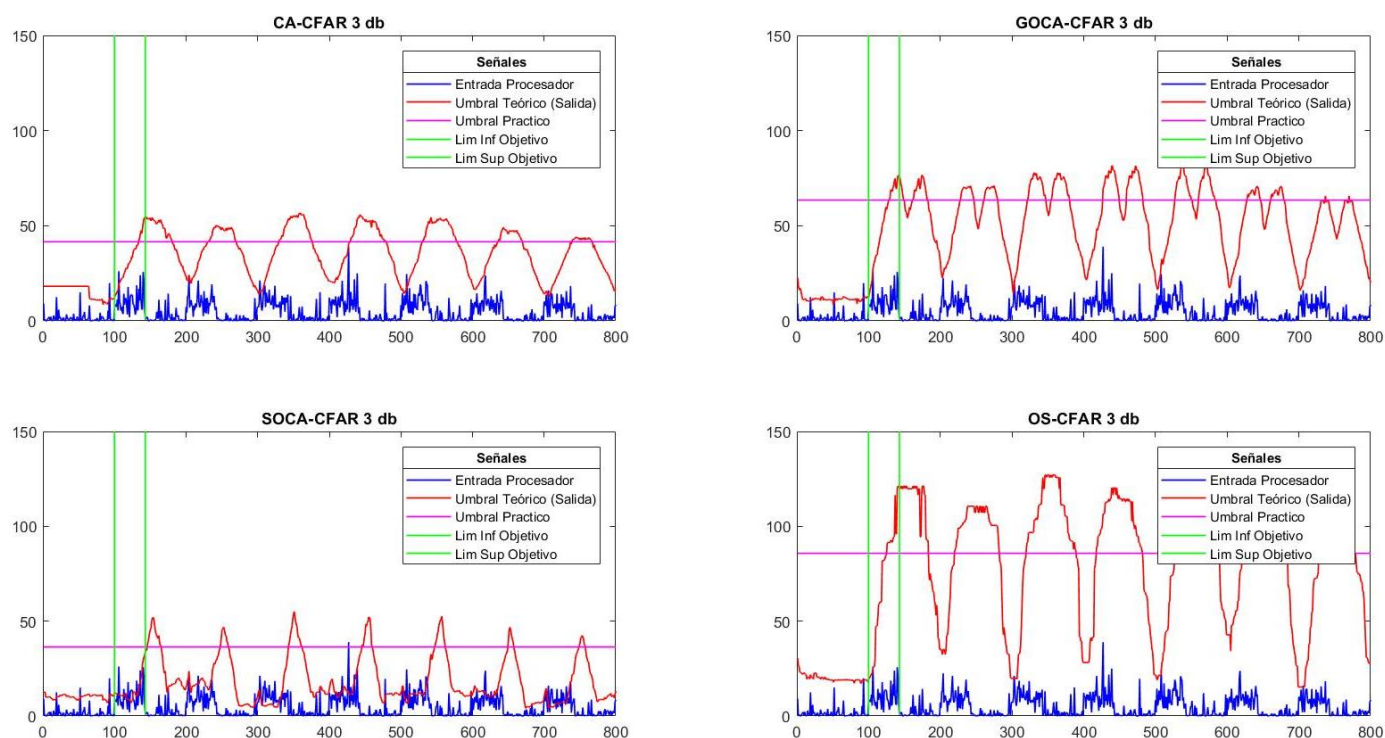
Umbrales de detección prácticos ( $T_p$ ),  $P_{fa} = 10^{-5}$ .

Ventana	Clutter CA-CFAR UmbralCA	Clutter SOCA- CFAR UmbralSO	Clutter GOCA- CFAR UmbralGO	Clutter OS-CFAR UmbralOS	Clutter Señal Entrada
$N_{ref} = 64$	68.55	61.80	94.41	83.60	67.6
$N_{ref} = 32$	70.57	61.05	121.81	81.74	67.6
$N_{ref} = 16$	109.34	96.17	173.32	109.86	67.6

### 4.3 Evaluación de Ventanas de Procesadores CFAR

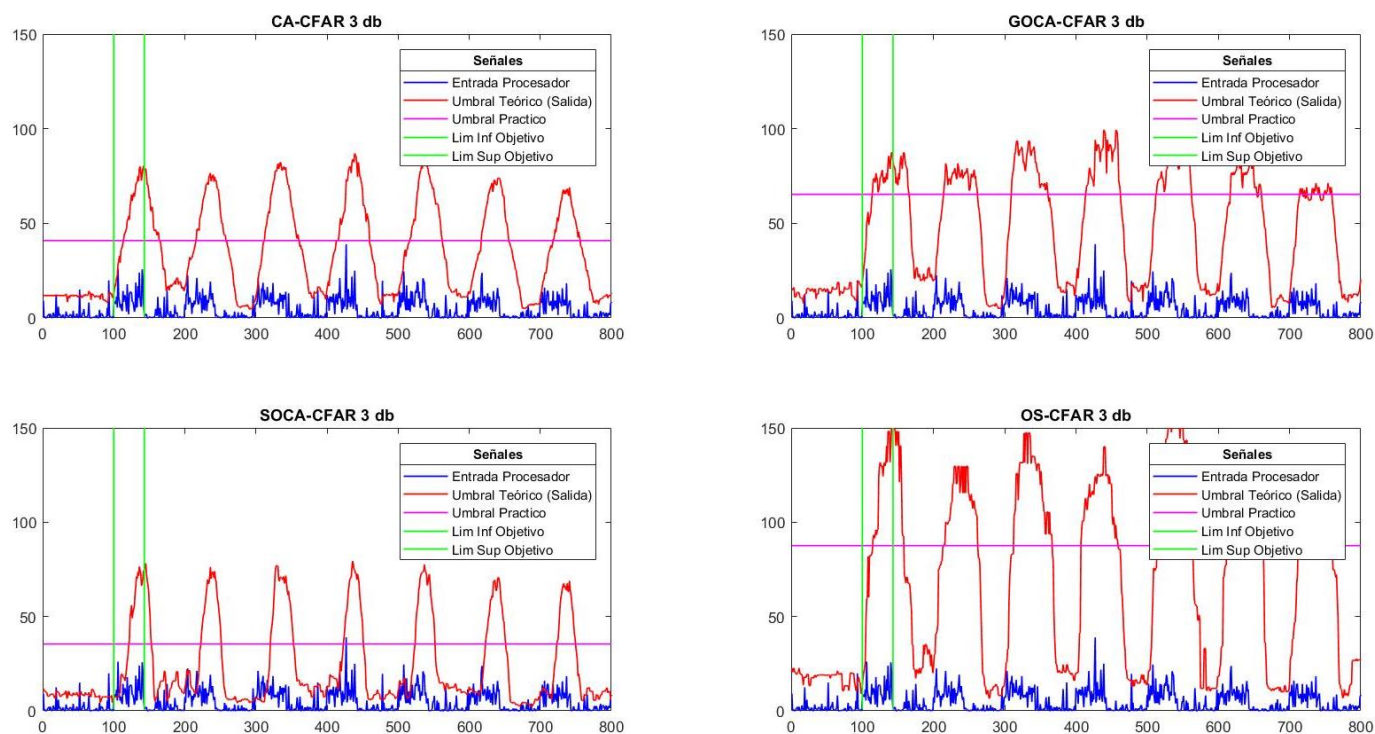
Una vez realizado el anterior procedimiento, continuamos con la evaluación de la ventana del procesador con el fin de verificar si el objetivo con  $N_i = 43$  muestras se puede detectar o no. En las Figuras 17, 18 y 19 que se muestran a continuación pertenecen a la detección de objetivos de

todos los procesadores CFAR con diferentes valores de tamaño de ventana  $N_{ref} = 64$ ,  $N_{ref} = 32$ ,  $N_{ref} = 16$  pero manteniendo constante el valor de la probabilidad de falsa alarma  $P_{fa} = 10^{-3}$ .



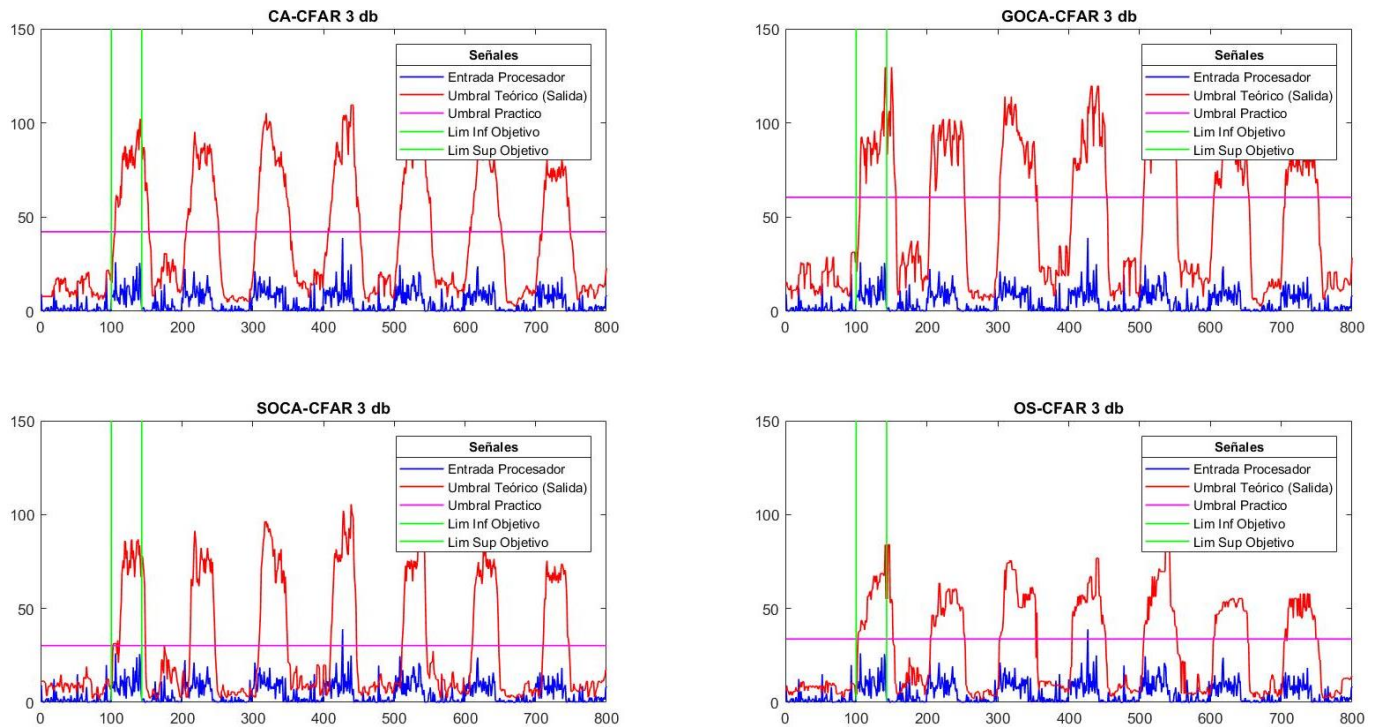
**Figura 17.** Detección de objetivo, Ventana  $N_{ref}=64$  y  $P_{fa}=10^{-3}$ .

En la Figura 17 se puede observar que el objetivo se encuentra desplazado y dependiendo del procesador sólo existe algunas muestras del objetivo.



**Figura 18.** Detección de objetivo, Ventana  $N_{ref}=32$  y  $P_{fa}=10^{-3}$ .

En la Figura 18 se puede observar que el objetivo no se encuentra tan desplazado y se puede identificar la mayoría de muestras del objetivo.

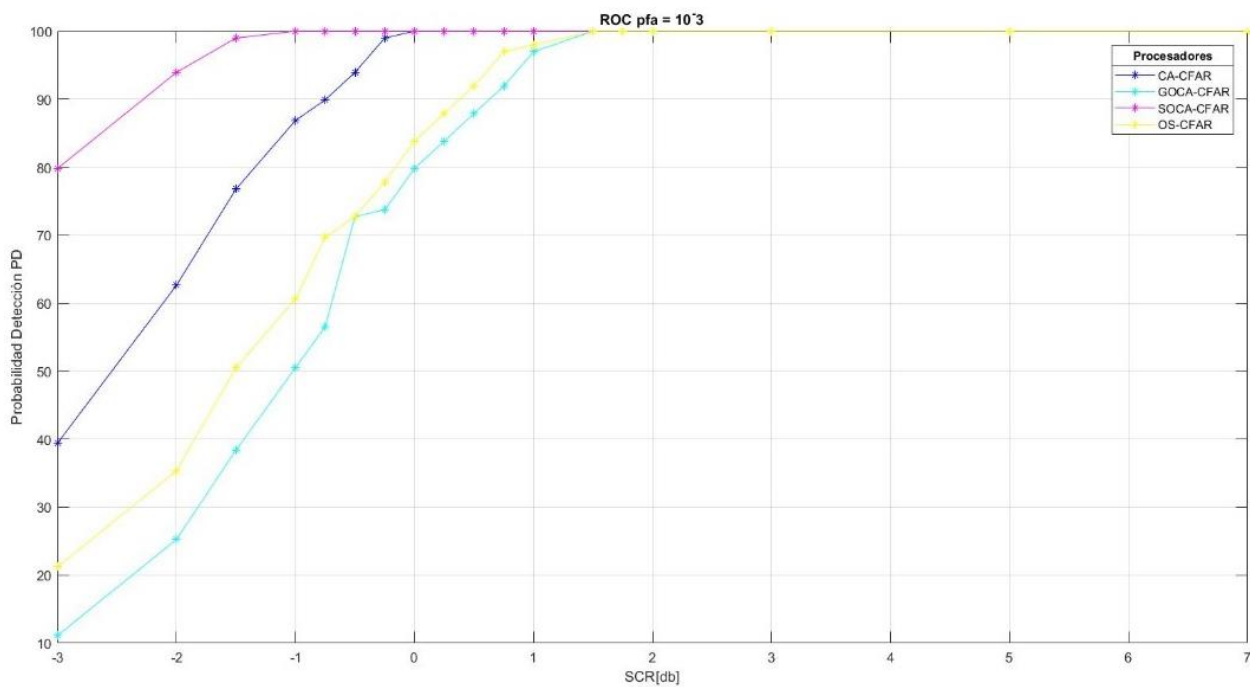


**Figura 19.** Detección de objetivo, Ventana  $N_{ref}=16$  y  $P_{fa}=10^{-3}$ .

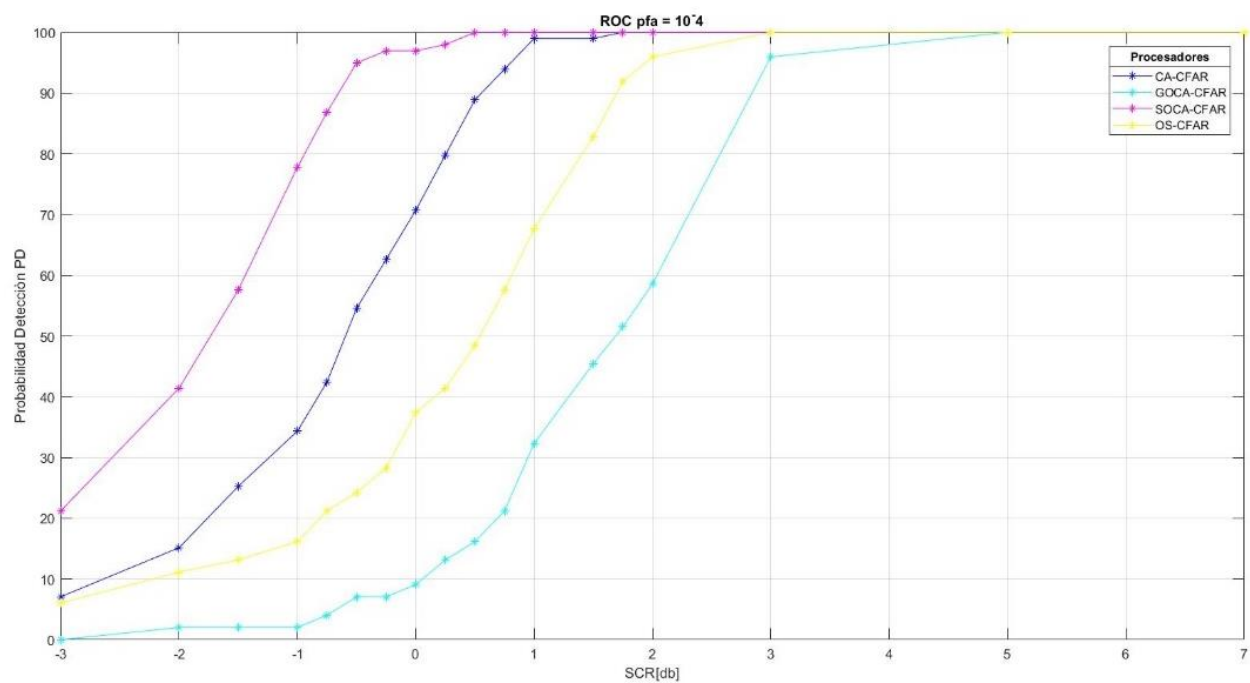
En la Figura 19 se puede observar que el objetivo ya no está desplazado y la mayoría de muestras identifican al objetivo, además existe una mejoría considerable en el umbral teórico o salida del procesador facilitando la detección del objetivo.

#### 4.4 Curvas Operacionales de Receptor ROC

Una vez verificado que con el tamaño de ventana  $N_{ref} = 16$  se puede obtener una mejor detección de objetivos, se procede a obtener las curvas operacionales de receptor “ROC”, utilizando simulaciones de Monte Carlo. En las Figuras 20, 21 y 22 representan las curvas operacionales de receptor ROC de los procesadores: CA-CFAR, GOCA-CFA, SOCA-CFAR y OS-CFAR, asignando diferentes valores de probabilidad de falsa alarma  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$ , respectivamente.

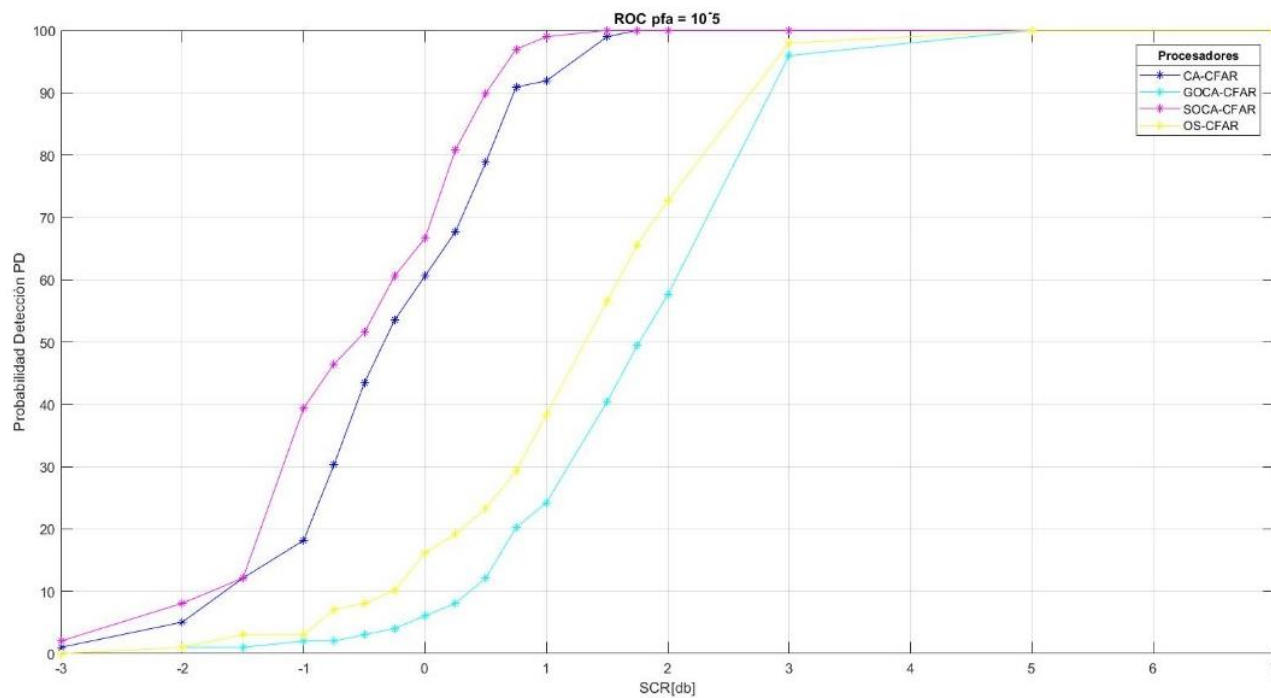


**Figura 20.** Curvas Operacionales de Receptor ROC,  $P_{fa}=10^{-3}$ .



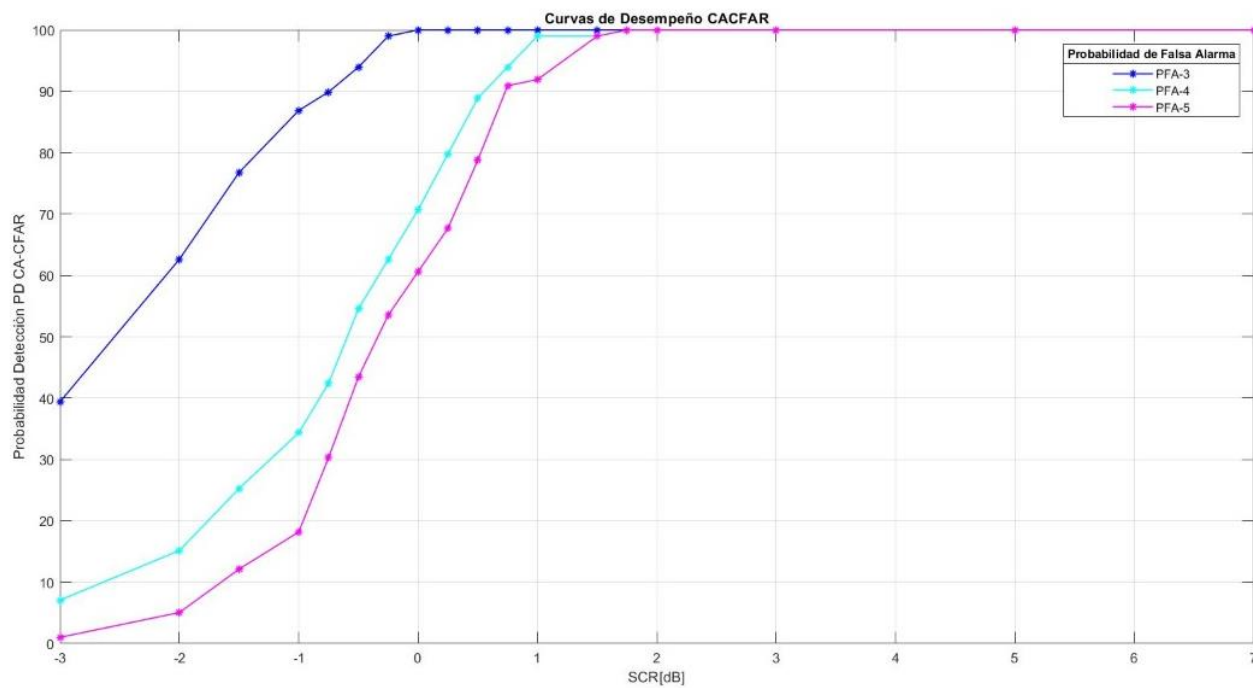
**Figura 21.** Curvas Operacionales de Receptor ROC,  $P_{fa}=10^{-4}$ .



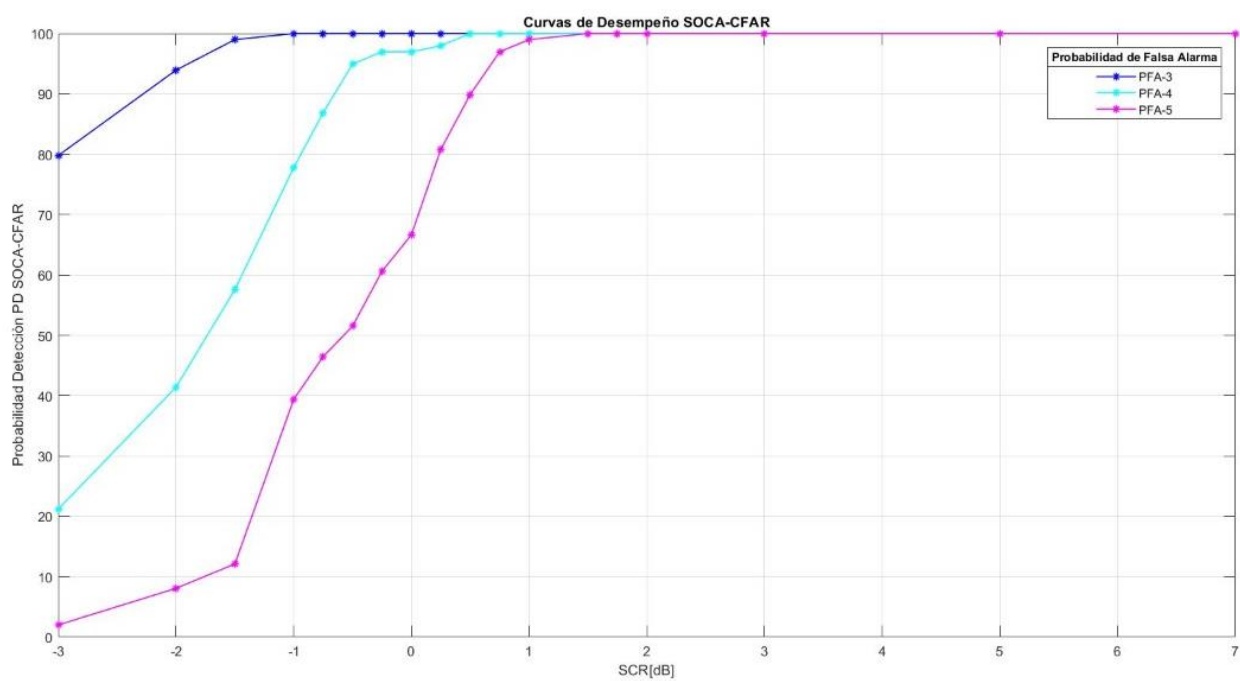


**Figura 22.** Curvas Operacionales de Receptor ROC,  $P_{fa}=10^{-5}$ .

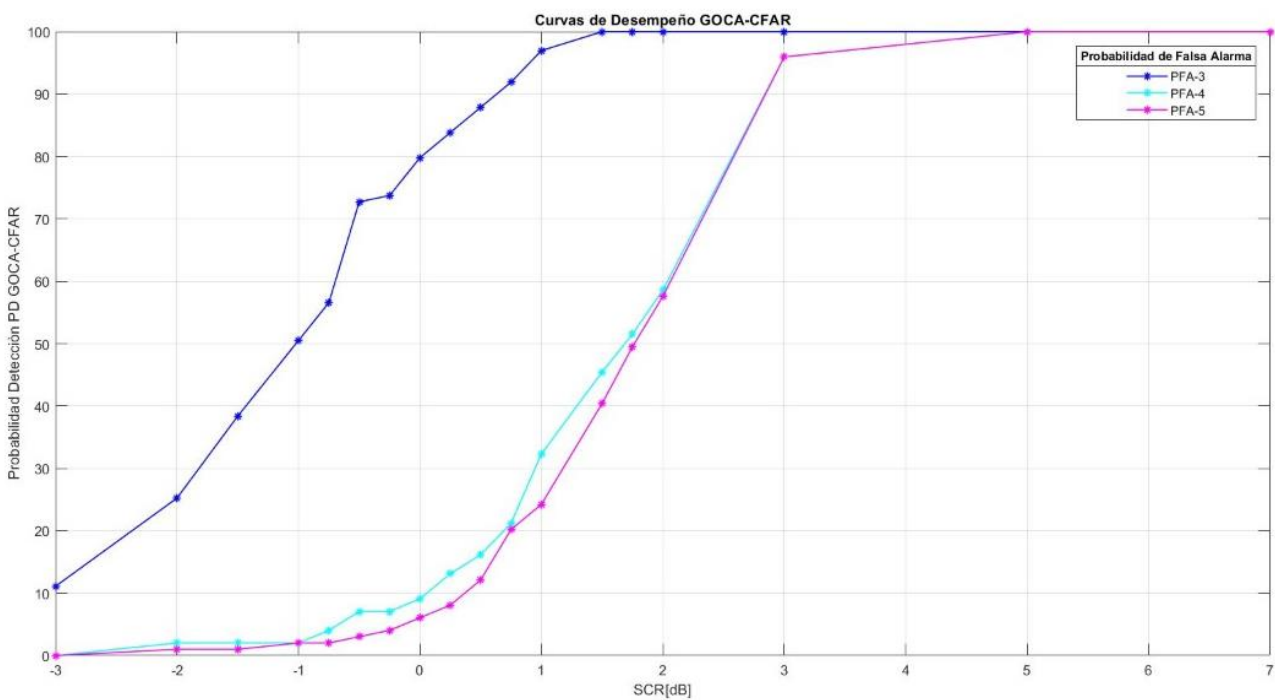
En las Figuras 23, 24, 25 y 26 que se muestran a continuación, indican las curvas operacionales de receptor ROC por cada procesador CFAR respectivamente; además se visualiza en cada Figura que cada procesador CFAR se prueba con todos los valores de probabilidad de falsa alarma  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$ .



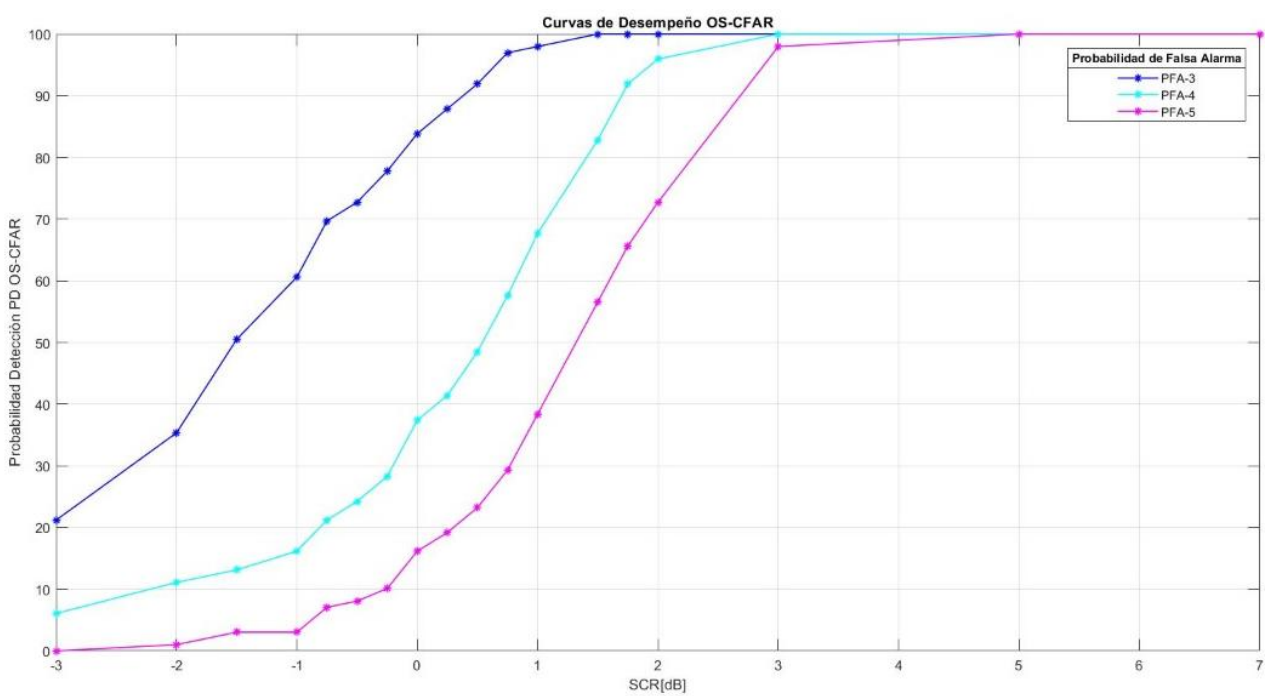
**Figura 23.** Curvas Operacionales de Receptor ROC CA-CFAR.



**Figura 24.** Curvas Operacionales de Receptor ROC SOCA-CFAR.



**Figura 25.** Curvas Operacionales de Receptor ROC GOCA-CFAR.



**Figura 26.** Curvas Operacionales de Receptor ROC OS-CFAR.

La Tabla 8 indica desde que valor relación señal clutter (SCR) los procesadores CFAR: CA-CFAR, SO-CFAR, GO-CFAR y OS-CFAR pueden obtener una probabilidad de detección igual y mayor al 80% para los diferentes valores de probabilidad de falsa alarma  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$ , en base a las figuras 23, 24, 25 y 26.

**Tabla 8**

*Probabilidad de detección a partir de 80%.*

Probabilidad de falsa alarma	SCR dB	SCR dB	SCR dB	SCR dB
	CA-CFAR	SO-CFAR	GO-CFAR	OS-CFAR
$P_{fa} = 10^{-3}$	-1.4	-3	0	-0.2
$P_{fa} = 10^{-4}$	0.25	-0.9	2.6	1.4
$P_{fa} = 10^{-5}$	0.5	0.25	2.6	2.3

Como se pudo observar en la Tabla 8, los procesadores que tienen mejor desempeño son CA-CFAR y SOCA-CFAR, esto se debe a que empiezan desde una relación señal clutter SCR negativa y dado que el objetivo de este proyecto de investigación era trabajar con valores alrededor o superiores a los 6 dB se deja en evidencia que los procesadores tienen un muy buen desempeño para SCR menores a 6dB; además se puede observar que los procesadores CA-CFAR y GO-CFAR para probabilidades de falsa alarma  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$  los valores de relación señal clutter SCR para una probabilidad de detección del 80% son similares e iguales mientras que el SO-CFAR y el OS CFAR son muy diferentes.

### 4.5 Costo Computacional

El procesador CFAR tiene tres etapas fundamentales: la primera etapa es la inicial, la segunda etapa es el desplazamiento de ventanas y la tercera etapa es la comparación. La primera etapa que corresponde a la inicial, está conformada por el número de muestras que ingresan al procesador, probabilidad de falsa alarma y umbral práctico calculado anteriormente, ventana del procesador y coeficiente del procesador en la segunda etapa que corresponde al desplazamiento, se analiza las muestras en *forma de anillo* cuyo resultado es el dato obtenido del procesador o salida del mismo. La tercera etapa que corresponde a la comparación, se la efectúa entre la salida del procesador (Umbral Teórico) y umbral práctico. En la Tabla 9 se muestra el respectivo costo computacional dividido por etapas acerca del programa para la ejecución de este proyecto.

En la Tabla 9, la etapa inicial y comparación se encuentran en todos los procesadores.

**Tabla 9**  
*Costo Computacional.*

Etapa	Nombre	Símbolo	Ecuación
<b>Inicial</b>	Muestras de Entrada al procesador	$S$	cte
	Ventana del Procesador	$N_{ref}$	cte
	Probabilidad de Falsa Alarma	$P_{fa}$	cte
	Umbral Practico	$Tp$	cte
	Coficiente del Procesador	$\alpha$	cte
	Selector de muestra en Ventana	$k$	cte

En la Tabla 10, 11, 12 y 13 el costo computacional se evidencia en la etapa del desplazamiento y comparación y varía de acuerdo al procesador y el número de muestras que ingresan al procesador ( $S$ ).

**Tabla 10**  
*Costo Computacional Procesador CA-CFAR*

Etapa	Nombre	Símbolo	Ecuación
<b>Desplazamiento de ventanas</b> (Se repite $S + N_{ref} - 1$ )	Celda Superior	$X$	Promedio vector $X$
	Celda Inferior	$Y$	Promedio vector $X$
	Dato obtenido del Procesador	$m$	$m = X + Y$
	Umbral Teórico (Salida Procesador)	$T$	$T = \alpha * m$
<b>Comparación</b>	Existe Objetivo	-----	$T > Tp$
	No existe Objetivo	-----	$T < Tp$
<b>Ciclo de máquina</b>			
<b>Número de muestras que ingresan</b>		<b>Tiempo de procesamiento (s)</b>	
$S = 10000$		$t = 0.031704$	
$S = 100000$		$t = 0.252932$	
$S = 1000000$		$t = 2.550467$	

**Tabla 11**  
*Costo Computacional Procesador SO-CFAR*

<b>Etapa</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ecuación</b>
<b>Desplazamiento de ventanas</b>  (Se repite $S + N_{ref} - 1$ )	Celda Superior	$X$	Mínimo del vector $X$
	Celda Inferior	$Y$	Mínimo del vector $Y$
	Dato obtenido del Procesador	$m$	$m = \min(X, Y)$
	Umbral Teórico (Salida Procesador)	$T$	$T = \alpha * m$
<b>Comparación</b>	Existe Objetivo	-----	$T > T_p$
	No existe Objetivo	-----	$T < T_p$
<b>Ciclo de máquina</b>			
<b>Número de muestras que ingresan</b>		<b>Tiempo de procesamiento (s)</b>	
$S = 10000$		$t = 0.030616$	
$S = 100000$		$t = 0.259686$	
$S = 1000000$		$t = 2.589259$	

**Tabla 12**  
*Costo Computacional Procesador GO-CFAR*

<b>Etapa</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ecuación</b>
<b>Desplazamiento de ventanas</b>  (Se repite $S + N_{ref} - 1$ )	Celda Superior	$X$	Máximo del vector X
	Celda Inferior	$Y$	Máximo del vector Y
	Dato obtenido del Procesador	$m$	$m = \max(X, Y)$
	Umbral Teórico (Salida Procesador)	$T$	$T = \alpha * m$
<b>Comparación</b>	Existe Objetivo	-----	$T > Tp$
	No existe Objetivo	-----	$T < Tp$
<b>Ciclo de máquina</b>			
<b>Número de muestras que ingresan</b>		<b>Tiempo de procesamiento (s)</b>	
$S = 10000$		$t = 0.030903$	
$S = 100000$		$t = 0.252581$	
$S = 1000000$		$t = 2.531597$	



**Tabla 13**  
*Costo Computacional Procesador OS-CFAR*

<b>Etapa</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ecuación</b>
<b>Desplazamiento de ventanas</b>  (Se repite $S + N_{ref} - 1$ )	Vector Orden	$V_o$	Ordeno de menor a mayor
	Dato obtenido del Procesador	$m$	$m = S(k)$
	Umbral Teórico (Salida Procesador)	$T$	$T = \alpha * m$
<b>Comparación</b>	Existe Objetivo	-----	$T > T_p$
	No existe Objetivo	-----	$T < T_p$
<b>Ciclo de máquina</b>			
<b>Número de muestras que ingresan</b>		<b>Tiempo de procesamiento (s)</b>	
$S = 10000$		$t = 0.037908$	
$S = 100000$		$t = 0.325236$	
$S = 1000000$		$t = 3.221117$	

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones

- El mejor tamaño de ventana de procesamiento que se acopla a los objetivos es el valor de  $N = 16$ , con este valor se logró obtener con más precisión las curvas de operación de receptor ROC de cada uno de los procesadores CFAR, además se identificó que cada procesador CFAR posee alta probabilidad de detección  $P_d$  frente a los diversos valores de probabilidad de falsa alarma  $P_{fa}$ , mismo con SCR inferiores a 6dB.
- Se consiguió evidenciar que el mejor procesador CFAR es el SOCA-CFAR, ya que tiene alta probabilidad de detección mayor al 80% para valores de relación señal clutter SCR inicialmente con -3 dB; por tanto, en el momento que se varía la probabilidad de falsa alarma de acuerdo a los valores de  $P_{fa} = 10^{-3}$ ,  $P_{fa} = 10^{-4}$ ,  $P_{fa} = 10^{-5}$  resulta que se mantienen bajos los valores de SCR ( $-0.9 \text{ dB}$ ,  $0.25 \text{ dB}$ ) comparando con los demás procesadores CFAR.
- Al realizar el estudio del arte de los procesadores CFAR, se identificó que todos analizan las muestras en forma longitudinal (en range) mientras que para este proyecto de investigación se decidió analizar las muestras en *forma de anillo*. Para lo cual se evidenció que el umbral teórico de cada procesador CFAR hace más notorio el objetivo, es decir, las muestras del objetivo presentan mayor amplitud diferenciando a un objetivo respecto del clutter, pero se debe incluir un nuevo umbral que en este caso será el umbral práctico para identificar objetivos.
- Se cumplieron con el objetivo general y los objetivos específicos planteados en el trabajo de graduación.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda usar el equipo TEKTRONIX MSO 4104, disponible en el CICTE, para la digitalización de las señales I y Q de cualquier radar, ya que al ser un osciloscopio digital permite digitalizar las señales analógicas de una forma sencilla, rápida y eficaz, concentrándose el equipo de investigación en el diagnóstico, desarrollo y evaluación de procesadores propios desarrollados de forma endógena.
- Para la implementación de cualquiera de las técnicas CFAR aquí descritas, se debe analizar a detalle el costo computacional por medio del número de operaciones que realiza el programa.
- Para el caso Oerlikon, utilizar el procesador SOCA-CFAR, ya que tiene alta probabilidad de detección mayor al 80% para incluso valores de relación señal clutter SCR de -3 dB.

## Referencias

- Beatriz, N. (2018). *Técnicas de Detección Radar en Escenarios Marítimos Heterogéneos* (Universidad Nacional del Sur; Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Elias, A., & Puga, J. (1989). Técnicas de detección adaptativa con tasa de falsa alarma constante. *Palestra Universitária*, (4), 247–303. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87253/T%E9cnicas+de+detecci%F3n+a+daptativa+con+tasa+de+falsa+alarma+constante.pdf?sequence=1>
- Farina, A., & Protopapa, A. (1988). New Results on Linear Prediction for Clutter Cancellation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 24(3), 275–285. <https://doi.org/10.1109/7.192095>
- Farina, A., & Russo, A. (1986). Radar Detection of Correlated Targets in Clutter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-22(5), 513–532. <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310717>
- Farina, A., Russo, A., & Scannapieco, F. (1987). Radar Detection in Coherent Weibull Clutter. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(6), 893–895. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165221>
- Habana, L. (2017). Revisión de los detectores CFAR de ventana deslizante. *Revista Telemática*, 16(1), 81–100. Retrieved from <http://www.revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele/article/view/255/237>
- Lara, M., & Ortiz, M. (2019). *Procesador Bayesiano de Señales de Radar* (1st ed.; U. de las F. A. ESPE, Ed.). Sangolquí.
- León, R. (1992a). *Estimación del parámetro de forma y de la densidad espectral de potencia de una secuencia Weibull coherente discreta en el tiempo*. San José.
- León, R. (1992b). *Señal Eco de Radar*. San José.
- Machado Fernández, J., & Bacallao Vidal, J. (2017). Distribuciones Estadísticas para Modelar Clutter Marino: una Revisión. *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 38(2), 12–35. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v38n2/eac02217.pdf>
- Mohammed B, A. (2015). Intelligent Approach to Improve Standard CFAR Detection in non-Gaussian Sea Clutter. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 16(2), 39–55. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2013.0625>
- Raúl, J., Fernández, M., Giquel, E. F., Carlos, R., Rams, S., & De, J. (2017). Implementación en VHDL de Procesador de Promediación Adaptado a Cambios Estadísticos en Clutter Weibull. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11(4), 1–13. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v11n4/rcci01417.pdf>
- Sekine, M., Ohtani, S., Musha, T., Irabu, T., Kiuchi, E., Hagsawa, T., & Tomita, Y. (1981).

Suppression of ground and weather clutter. *IEE Proceedings F: Communications Radar and Signal Processing*, 128(3), 175–178. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1981.0028>

Sekine, Matsuo, & Yuhai, M. (1990). *Weibull Radar Clutter* (T. I. of E. and Technology, Ed.). London, United Kingdom: Peter Peregrinus Ltd.

Short, R. D. (1982). An Adaptive MTI for Weather Clutter Suppression. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-18(5), 552–562. <https://doi.org/10.1109/TAES.1982.309268>

Tamames, E., Fdez. de Muniam, J., & Elías, A. (1991). *Análisis y Caracterización de un Detector Radar en entornos interferentes con estadística Weibull coherente*. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/84000/Analisis+y+caracterizaci%F3n+de+un+detector+radar+en+entornos+interferentes+con+estadistica+Weibull+coherente.pdf;jsessionid=D252CFDE4ED3582878A0A3A9CD61A915?sequence=1>

Tektronix Inc. (2004). *MSO4000B and DPO4000B Series Digital Phosphor Oscilloscopes*. Retrieved from <https://www.tek.com/oscilloscope/dpo4054-manual/mso4000-and-dpo4000-series-0>