

COBERTURA MÁXIMA DE RADAR DE BLANCOS NAVALES Y A BAJA ALTURA PARA EL ESTADO DEL MAR COMO PARÁMETRO. PREDICCIÓN DEL ESTADO DEL MAR POR RADAR

Nelson Chávez Ferry¹, Giorgia Rodríguez Almaguer², Lena Lizbet La Ó Ramirez³,

Dayron Manuel Santana García⁴

¹Profesor Titular, Consultante, CUJAE, ²Instructor, CUJAE, ³Empresa Eléctrica - Matanzas, ³ETECSA

¹e-mail: nelson@tele.cujae.edu.cu, ²e-mail: giorgiara@nauta.cu, ³e-mail: lenalisbet@nauta.cu,

⁴e-mail: dayronmlsg@nauta.cu

RESUMEN

En este artículo se presenta, para blancos navales y a baja altura, un nuevo enfoque para la predicción de la cobertura de radar y la óptima selección de su ubicación, basado en el criterio de máxima cobertura de la superficie iluminada del mar. Este método propone un modelo para la superficie efectiva de retrodispersión normalizada de la superficie del mar, para radares de costa y navales ubicados en el terreno, que operan en la banda X con polarización horizontal, cuyas alturas de la antena con relación al nivel del mar permiten el uso de las tablas de Nathanson para ángulos de rasancia entre $0,1^0$ y 1^0 . Se propone también un segundo método, para estimar el estado del mar mediante el procesamiento de la señal a la salida del receptor, empleando también las tablas de Nathanson. En ambos casos, los algoritmos desarrollados son aplicados a un terreno simulado, para dos tipos de radares navales, mostrándose los resultados.

PALABRAS CLAVES: Superficie efectiva de retrodispersión normalizada de la superficie marina, cobertura de radar, estado del mar, modelos de Swerling, radares navales y de costa, ángulo de rasancia.

MAXIMUM RADAR COVERAGE OF NAVAL AND LOW-FLYING TARGETS FOR THE SEA STATE AS A PARAMETER. RADAR PREDICTION OF THE SEA STATE

ABSTRACT

This paper introduces, for naval and low-flying targets, a new approach for the prediction of radar coverage and the optimal selection of its position based on the criterion of maximum coverage of the illuminated sea surface. This method is based on a proposed model for the normalized backward radar cross section of the sea surface, for coastal and nautical radars positioned on the terrain, operating in the X band with horizontal polarization. The antenna height, above sea level, allows the use of Nathanson's tables for grazing angles between $0,1^0$ and 1^0 . A second method is also proposed, to estimate the sea state by processing the signal at the output of the receiver, using the Nathanson tables. In both cases, the developed algorithms are applied to a simulated terrain for two types of nautical radars, showing the results.

KEYWORDS: Normalized radar cross-section of the sea surface, radar coverage, sea state, Swerling model, nautical and coastal radars, grazing angle.

1. INTRODUCCIÓN

La predicción de la zona de visibilidad o cobertura de radar es fundamental para evaluar la calidad con la cual un sistema de radar realiza la observación de una región determinada o para seleccionar el sistema apropiado que cumpla con las exigencias deseadas, entre ellas que la probabilidad con la que debe ser detectado el blanco esperado no sea menor que un valor dado, valor que determina la calidad de la detección. Una cobertura efectiva de radar está estrechamente relacionada con la ubicación del radar o de los radares

destinados a cubrir o realizar la exploración de la región de interés. Las irregularidades del terreno donde se ubique el radar pueden establecer límites en el alcance efectivo del mismo, incluso crear sectores de visibilidad nula, siendo de fundamental importancia el conocimiento y el dominio que se tenga de este. Son diversos los métodos de cálculo empleados en la determinación de los parámetros de la zona de visibilidad de un sistema de radar, tanto los publicados, entre ellos [1 - 4], como los que se imparten en los cursos de pregrado y postgrado de teoría y aplicaciones de radar. En el cálculo de la cobertura o zona de visibilidad de radar, interviene el efecto provocado por la dispersión de las ondas de radio en la superficie del mar, en particular la retrodispersión, conocido por clutter marino, que origina interferencia al mezclarse con la señal útil o señal procedente del blanco. La calidad de la detección, definida como la probabilidad con la que se detecta un blanco determinado, para una probabilidad de falsa alarma dada, queda determinada por el nivel de la relación señal a clutter a la entrada del umbral de detección [5 - 7].

En este trabajo se hace un enfoque novedoso de este problema, para el caso de blancos navales y a baja altura, proponiendo un algoritmo para el cálculo de la cobertura y la elección de su ubicación para maximizar el área de la superficie marina iluminada, considerando el estado del mar como parámetro explícito de referencia. El valor de la superficie efectiva de retrodispersión normalizada o específica (SERDE) se obtiene de un modelo que se propone, para la banda X, la generalmente empleada en los radares navales y de costa, la polarización horizontal y radar de pulsos, más simple que los que aparecen en la literatura especializada, lográndose del mismo valores muy aproximados a los que aparecen en las tablas de F.E. Nathanson [8]. Este método de predecir la cobertura, constituye, en opinión de los autores de este trabajo, un aporte a los métodos de predicción de la cobertura de radar para blancos sobre la superficie marina o a baja altura sobre ella. Además de este algoritmo, en el artículo se fundamenta otro que permite, a partir de la señal de salida de la etapa de video del receptor del radar, estimar el estado del mar, lo que tributa al conocimiento del entorno marino, a la seguridad de la navegación y a la meteorología marítima.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. MODELO PROPUESTO PARA LA SUPERFICIE EFECTIVA DE RETRODISPERSIÓN NORMALIZADA DE LA SUPERFICIE DEL MAR

Suponiendo tierra plana, lo que puede aceptarse teniendo en cuenta que, generalmente en la práctica, para radares navales y de observación de costa, las distancias a las que se espera detectar blancos son menores de 20 millas náuticas, la geometría del problema es la mostrada en la figura 1, para dos casos, cuando no hay obstáculos en el terreno que provoquen ángulos de cierre, figura 1a, y cuando los hay dando lugar a ello.

Durante la exploración por distancia de la superficie del mar, para cada acimut considerado, en el tramo AB, correspondiente a los ángulos de rasancia ε_A , ε_B y a las distancias horizontales R_A , R_B , donde es posible obtener, como se explicará más adelante, los valores de la superficie efectiva de retrodispersión específica (SERDE), se evalúa la relación señal a clutter (RSC), empleando las ecuaciones de radar para un blanco puntual y para uno distribuido o extendido de forma superficial [5].

De la familia de curvas, P_D vs RSI, correspondiente a los modelos de blanco puntual y clutter considerados, para el valor hallado de la RSC y para la probabilidad de falsa alarma P_F dada, se obtiene la probabilidad de detección P_D , que comparada con la exigida P_D^* , permite determinar el límite de la zona de visibilidad o cobertura para el acimut considerado, lo que se cumple cuando $P_D \leq P_D^*$. Repitiendo esta operación para cada acimut, hasta cubrir el sector angular considerado, queda determinada la cobertura de radar, para los modelos supuestos, del blanco puntual que se desea detectar, ya sea un blanco naval o uno a baja altura, y del clutter marino, con el estado del mar como parámetro.

La interferencia provocada por el clutter marino y por tanto, la RSC, está determinada, tanto por los parámetros del radar empleado, como por las características del medio que rodea al radar y de la SERDE de la superficie del mar, que en lo adelante se representará por σ^0 y que depende, marcadamente, del tipo de clutter marino. Varios son los modelos propuestos para la SERDE, los más empleados por los autores en la literatura especializada [9, 10] son, NRL (Naval Radar Laboratory), GTI (Georgia Technological Institute), Modelo Híbrido y TSC. Estos modelos toman como referencia las tablas de Nathanson [8] las que dan los valores promedios de la SERDE, para el caso de radar monoestático de pulsos, la frecuencia de

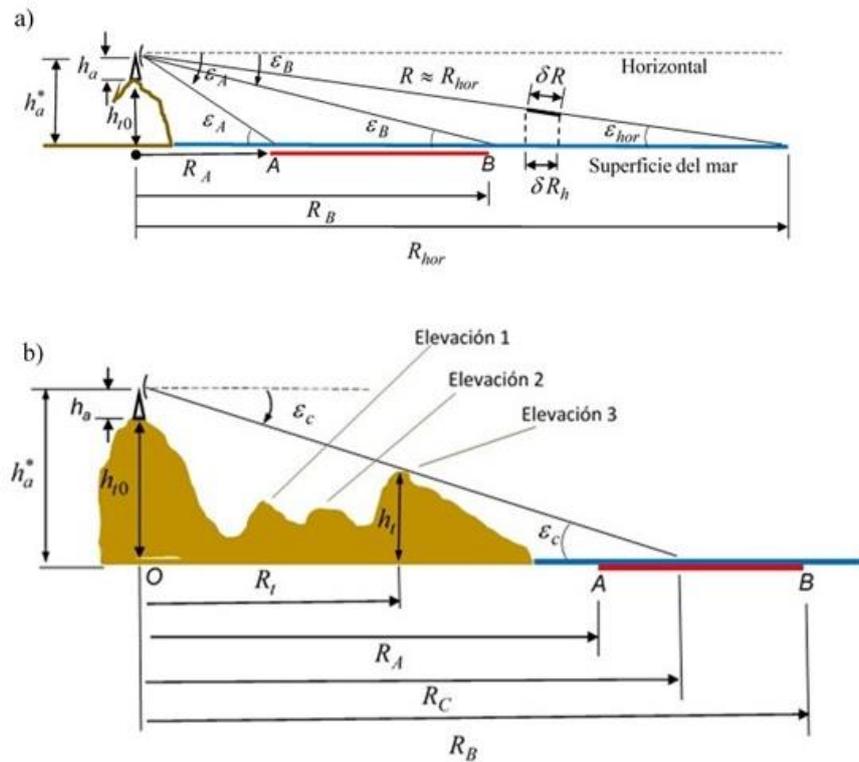


Figura 1: Geometría del problema: a) Ausencia de ángulos de cierre; b) Presencia de ángulo de cierre.

la señal de sondeo empleada, la polarización (horizontal o vertical), el ángulo de rasancia y el estado del mar. El GTI fue uno de los primeros modelos que fueron propuestos, a finales de la década del 70. Los modelos híbridos y TSC han mejorado las características del GTI, pero el que más aceptación ha tenido es el NRL (Naval Research Laboratory), que en síntesis es el siguiente, donde SS representa el estado del mar.

$$\sigma^0 = C1 + C2 \log_{10} \sin \alpha + \frac{(C3 + C4 \alpha) \log_{10} f}{1 + C5 \alpha + C6 SS} + C7 (1 + SS)^{\frac{1}{2 + C8 \alpha + C9 SS}} \quad (1)$$

TABLA 1 Constantes para el modelo NRL.

CONSTANTE	POLARIZACIÓN	
	HORIZONTAL	VERTICAL
C1	-72,76	-48,56
C2	21,11	26,30
C3	24,78	29,05
C4	4,917	-0,5183
C5	0,6216	1,057
C6	-0,02949	0,04839
C7	26,19	21,37
C8	0,09345	0,07466
C9	0,05031	0,04623

El objetivo de la investigación, expuesta en este artículo, es predecir la zona de visibilidad o cobertura para radares navales y de costa, los cuales, por lo general, operan en la banda X con polarización horizontal, cumpliéndose, además, de tener los ángulos de rasancia valores pequeños, en el caso de esta investigación estarán comprendidos entre $0,1^0$ y 1^0 . Es por ello que se propone un modelo para la SERDE en correspondencia con estas condiciones, modelo más sencillo que el de la NRL y que se ajusta a las tablas

de Nathanson, con un error absoluto promedio de 2 dB. El modelo y la correspondiente tabla de constantes, para radar monoestático de pulsos, banda X, duración del pulso de 0,5 μ s a 10 μ s y polarización horizontal, son los siguientes

$$\sigma_0^0 = a(1+b\varepsilon) \exp(-c\varepsilon) \text{ dB} \quad (2)$$

$$0,1^0 \leq \varepsilon \leq 1^0$$

TABLA 2 Constantes para el modelo propuesto.

Constantes	Estado del mar				
	1	2	3	4	5
<i>a</i>	73	62,2	55	48,5	42,5
<i>b</i>	0	0	0	0,65	0,76
<i>c</i>	1/3	1/3,4	1/3	0,8	0,8

3. ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA COBERTURA DE RADAR Y LA ELECCIÓN ÓPTIMA DEL EMPLAZAMIENTO

Las potencias medias P_s y P_c de las señales procedentes del blanco puntual que se desea detectar (buque, aeronave) y de la superficie del mar, respectivamente, se expresan por [5, 11]

$$P_s = \frac{P_p G_a(\varepsilon)^2 \sigma_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{P_p G_a(\varepsilon)^2 \sigma_c \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

$$= \frac{P_p G_a(\varepsilon)^2 \lambda^2 \sigma_0 \delta\beta \delta R}{(4\pi)^3 L R^3 \cos \varepsilon} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \sigma_0 R_h \delta\beta \delta R = \sigma_0 \frac{R \delta\beta \delta R}{\cos \varepsilon}$$

Dividiendo (3) entre (4) se obtiene la RSC P_s / P_c , dada por

$$\frac{P_s}{P_c} = \frac{\sigma_0}{R \delta\beta \delta R \sigma_0} \quad (5)$$

Significado de los símbolos empleados en las fórmulas de la (3) a la (5)

- R ----- Alcance del radar (distancia entre el radar y el blanco).
- P_p ----- Potencia del pulso de RF de sondeo.
- P_c ----- Potencia del clutter proveniente de la célula resolutive que contiene al blanco a la entrada de la antena.
- P_s ----- Potencia de la señal reflejada por el blanco a la entrada de la antena.
- L ----- Pérdidas en el sistema de radar, más las producidas durante la propagación de las señales de RF (sondeo y reflejada)
- ε ----- Ángulo de rasancia.
- τ ----- Duración del pulso de RF de sondeo.
- $\delta\beta$ ----- Poder resolutive por azimut = ángulo del lóbulo principal del patrón de radiación, medido por los puntos de -3dB en el plano, normal al plano vertical, que pasa por la dirección de máxima radiación .
- δR ----- Poder resolutive por distancia igual a $c\tau/2$.
- $G_a(\varepsilon)$ ----- Ganancia de potencia de la antena.
- λ ----- Longitud de onda de la portadora de la señal de sondeo.
- σ_0 ----- Superficie efectiva de retrodispersión media del blanco (SERD).

- σ^0 ----- Superficie efectiva de retrodispersión normalizada media del clutter.
- h_a ----- Altura de la antena con relación al nivel del mar.
- P_s/P_c ----- Relación entre la potencia media de la señal del blanco y la potencia media del clutter.

Algoritmo propuesto [11]:

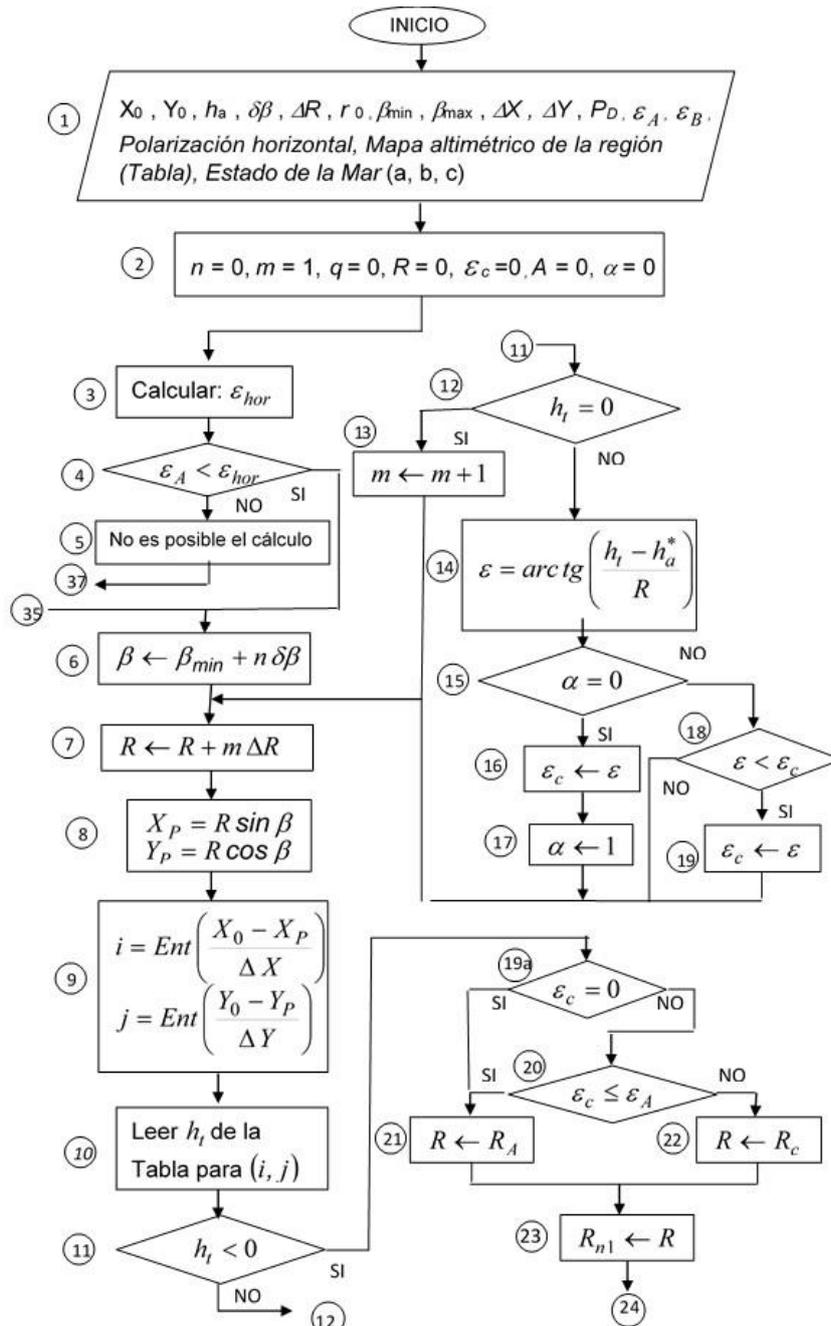


Figura 2: Diagrama de bloques del algoritmo para el cálculo de la cobertura de radar (bloques 1 - 23).

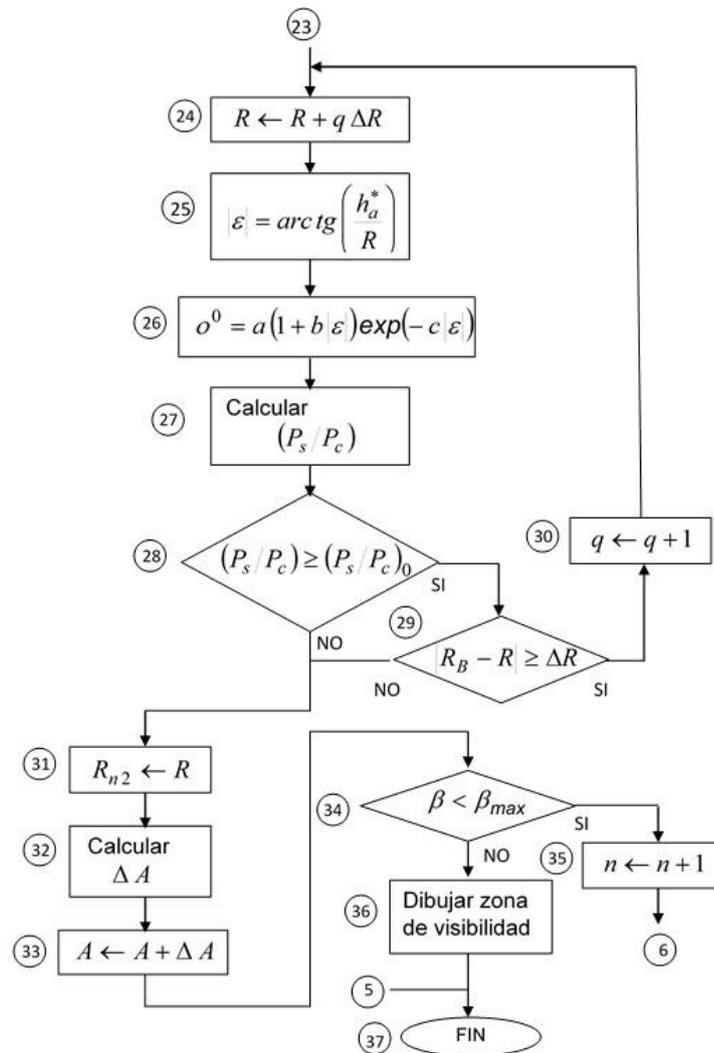


Figura 3: Diagrama de bloques del algoritmo para el cálculo de la cobertura de radar (bloques 24 – 37).

OPERACIONES INDICADAS EN EL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO

1 - Datos de entrada:

$$h_a = 3 \text{ m}, \delta\beta = 1^0, \Delta R = 50 \text{ m}, \beta_{\min} = 330^0, \beta_{\max} = 390^0, \\ \Delta X = \Delta Y = 50 \text{ m}, P_D = 0,6, \text{ estado de la mar : EM 3 } (a = 55, b = 0, c = 1/3), \\ \rho = 4,12, \varepsilon_A = \varepsilon_{\min} = 0,1^0, \varepsilon_B = \varepsilon_{\max} = 1^0.$$

2 – Variables de control

3 – Cálculo del ángulo de elevación al horizonte de radio.

4 y 5 – Determinación del posible cálculo de la cobertura. Si es ε_A mayor que ε_B significa que el intervalo de distancia, $R_B - R_A$ a considerar se encuentra más allá del horizonte de radio lo que evidentemente hace que sea imposible el cálculo de la cobertura de radar.

6. – Valores que va tomando el azimut β , con paso $\delta\beta$, para cada valor de n .

7 -- Valores que va tomando la distancia R , con paso ΔR , para cada valor de m .

8 – Coordenadas rectangulares del punto P sobre la superficie terrestre (marina) para cada valor de m , tomando como referencia el origen de coordenadas dado en el mapa digital altimétrico (tabla).

- 9 – Obtención de la columna i y la fila j de la tabla dada, a partir de las coordenadas obtenidas en el punto 8, donde aparece la altura h_t del terreno correspondiente al punto P .
- 10 – Lectura en la Tabla de la altura h_t correspondiente al punto P .
- 11 – Control, si para el valor actual de m , el punto P se encuentra sobre el terreno o sobre la superficie marina. El cálculo de los ángulos de cierre \mathcal{E}_c solo tienen lugar sobre la superficie del terreno
- 12 – Se pregunta si hay irregularidad del terreno; si no la hay ($h_t = 0$) se realiza un incremento de R , correspondiente a un nuevo valor de m . Si hay una irregularidad del terreno ($h_t > 0$) se pasa al punto 14 para calcular el ángulo de cierre correspondiente.
- 13 – Incremento de la distancia R en un paso ΔR .
- 14 – Cálculo del ángulo de elevación ε , para el punto P actual, para considerarlo como posible ángulo de cierre ε_c .
- 15 al 19 – Se decide si el ángulo de elevación ε es ángulo de cierre ε_c , terminando el recorrido hasta el final del terreno ($h_t < 0$), sólo existen dos casos: o no hay ángulo de cierre, lo que tendrá lugar cuando $h_t = 0$ para todo el recorrido sobre el terreno o se habrá determinado un solo ángulo de cierre ε_c , el menor de todos los calculados. Continuar ciclo de incrementos de R hasta llegar a 11. Si en 11 se tiene que $h_t < 0$, que se terminó el terreno y comienza la superficie del mar, se pasa a 20.
- 20 a 23 – Se determina donde comienza a calcularse la cobertura del radar, si en el punto A (Ver Fig.1) o a partir de la distancia determinada por el ángulo de cierre ε_c calculado. Esta distancia de inicio de los cálculos de detección se le designa por R_{n1} , lo que significa que para el azimut n el cálculo de detección se comienza para R_{n1} .
- 24 a 27 – Ciclo de incremento de R para el cálculo de la relación señal a clutter (P_s/P_c) obtenida, para cada valor del paso q , y su comparación con la obtenida de la curva de detección $(P_s/P_c)_0$ para la probabilidad P_D dada en los datos de entrada.
- 28 a 31 – Cálculo de de la distancia máxima R_{n2} de la cobertura o ZVR para el azimut n considerado.
- 32 y 33 – Cálculo de los incrementos de área ΔA , para cada azimut considerado y la obtención del área total correspondiente a la ZVR.
- 34 y 35 – incremento del azimut por el paso $\delta\beta$, desde β_{min} hasta β_{max} .
- 36 – Dibujar la ZVR, lo que se pondrá de dos formas:
 - 1) Trazando los intervalos de distancia, $R_{n2} - R_{n1}$ para cada valor de n ;
 - 2) Dibujando los trazos correspondientes al primer y último intervalo de distancias ($n = 0$ y $n = n_{max}$) y uniendo mediante trazos los puntos $n1$, $n = 0, \dots, n_{max}$ y los puntos $n2$, $n = 0, \dots, n_{max}$.

OPERACIONES INDICADAS EN EL DIAGRAMA DE BLOQUES EN LA FIGURA 4

Este algoritmo, insertado en el Algoritmo anterior, permite la selección del punto de ubicación del radar atendiendo al criterio de máxima cobertura de radar.

- 1 - Datos de entrada: Se dan como datos las coordenadas de los lugares de posible ubicación, $\{X_{0k}, Y_{0k}\}$ para $k \in \mathcal{N}$ {Ubicaciones posibles para el radar}.
- 2 – Variables de control. Se añade $A_k = 0 \forall k$, que representa la k -ésima área de cobertura correspondiente a la k -ésima zona de visibilidad de radar (ZVR). Se calcula un número k_{max} de áreas y se selecciona la mayor, correspondiente al punto de ubicación: $X_0 \leftarrow X_k, Y_0 \leftarrow Y_k$

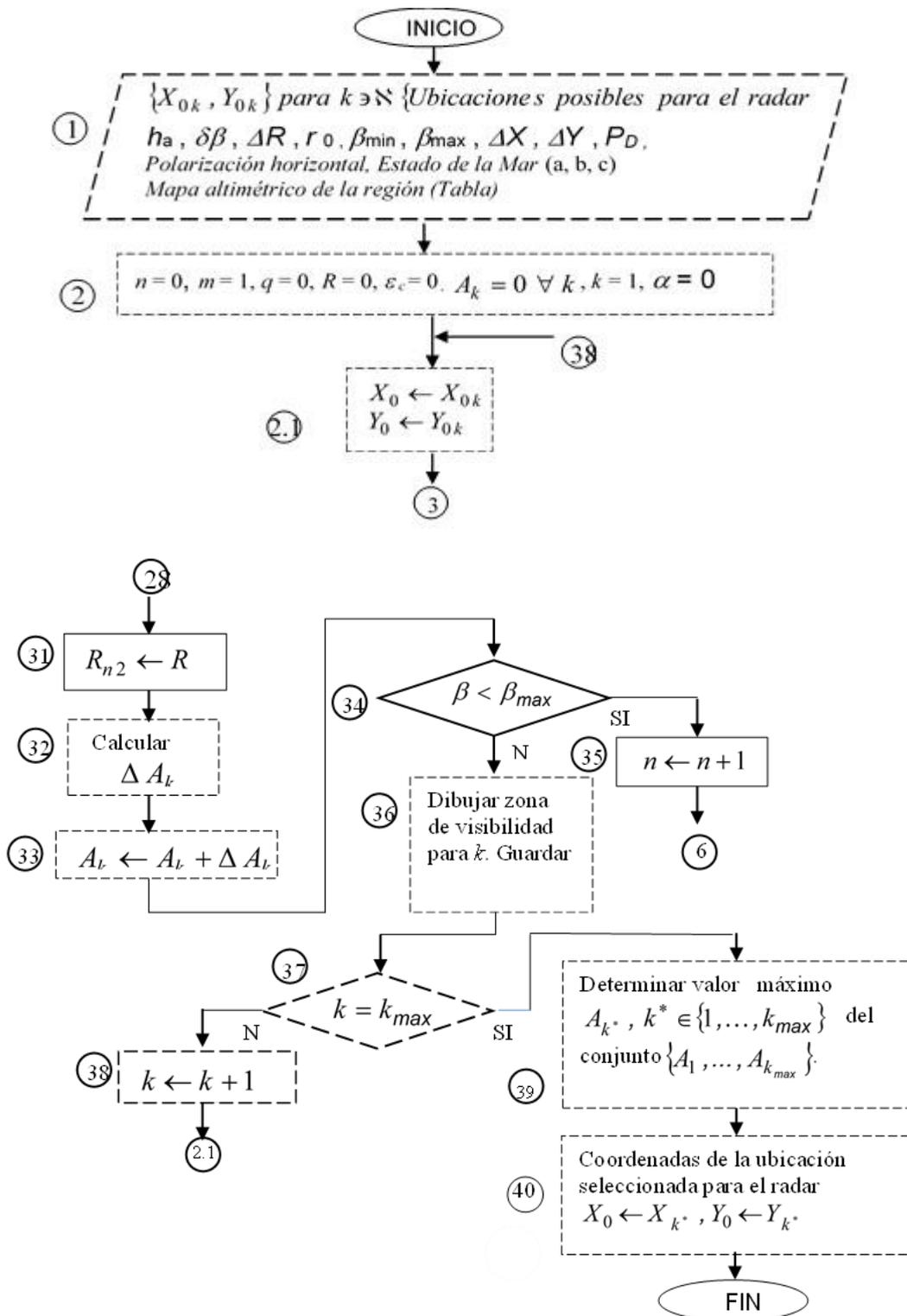


Figura 4: Complemento del algoritmo Fig.3, para la elección de la ubicación del radar para máxima cobertura.

4. SIMULACIÓN DE LA COBERTURA ÓPTIMA

Se aplica el algoritmo propuesto [11] empleando MATLAB versión – R2020a, utilizando, como datos de entrada: Radar NAVI – RADAR 4000, mapa digital del terreno de una región, en relieve (a), en curvas de nivel (b) y en cuadrículas de 50 m de lado (c), para una superficie rectangular de 1,5 km por el eje X y 0,95 km por el eje Y , dándose la altura en metros por el eje Z . Fuera de la frontera de esta región, las alturas son iguales a cero, en particular la superficie del mar. Se tomaron dos ubicaciones del radar: posición 1, (13, 3, 12) y posición 2, (17, 10, 6). Se supuso un blanco no fluctuante de SERD media, $\sigma_0 = 4 m^2$, en presencia de clutter con distribución de Rayleigh, aplicándose para la detección, el método *Peak with Interval Selection* [5], empleando la curva de detección para una muestra de 10 valores independientes, resultando para una probabilidad de detección $P_D = 0,6$, una RSC límite, $RSC \approx 2 = 3$ dB. Sector angular de exploración: $0^0 \leq \beta \leq 60^0$. Como resultado, la posición óptima es la No 1.

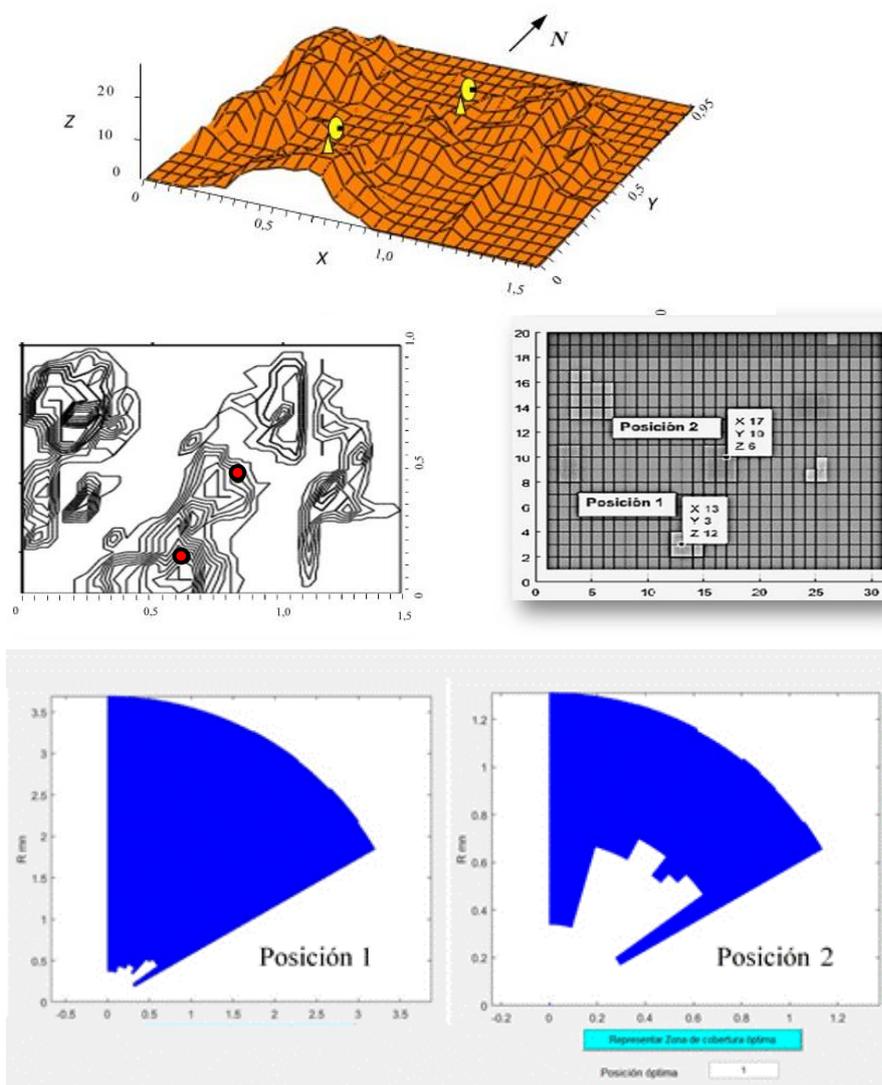


Figura 5: Simulación de la cobertura óptima, entre dos posiciones, para la ubicación del radar.

5. ESTIMACIÓN DEL ESTADO DEL MAR POR RADAR

Uno de los objetivos de la investigación que se presenta en este artículo es, estimar el estado del mar, el cual, por lo general, es obtenido de fuentes de información dedicadas a la obtención de los parámetros del

mar. En el presente trabajo se propone y se fundamenta la forma y el método a seguir, con el correspondiente algoritmo asociado, para estimar el estado del mar desde el radar que realiza la observación de la superficie del mar [12]. De (4) se puede expresar, sin dificultad, la potencia media del clutter a la entrada de la antena, para tres ángulos de rasancia

$$P_{ci} = \frac{P_p G_a^2(\varepsilon_i) \lambda^2 \delta\beta \delta R (R_i^2 - h_a^2)^{-\frac{1}{2}}}{(4\pi)^3 L R_i^2} \sigma^0, \quad i=1,2,3$$

$$= k_i \sigma^0 \quad (6)$$

$$k_i = \frac{P_p G_a^2(\varepsilon_i) \lambda^2 \delta\beta \delta R (R_i^2 - h_a^2)^{-\frac{1}{2}}}{(4\pi)^3 L R_i^2}$$

$$\begin{cases} R_1 = 573 h_a, \varepsilon = 0,1^0 \\ R_2 = 191 h_a, \varepsilon = 0,3^0 \\ R_3 = 57 h_a, \varepsilon = 1^0 \end{cases} \quad (7)$$

Para una ganancia de potencia G_{sr} del receptor, la potencia media P_{cvi} , del clutter a la salida de la etapa de video, ver Fig. 3, será

$$P_{cvi} = K_i \sigma_i^0$$

$$K_i = G_{sr} k_i \quad (8)$$

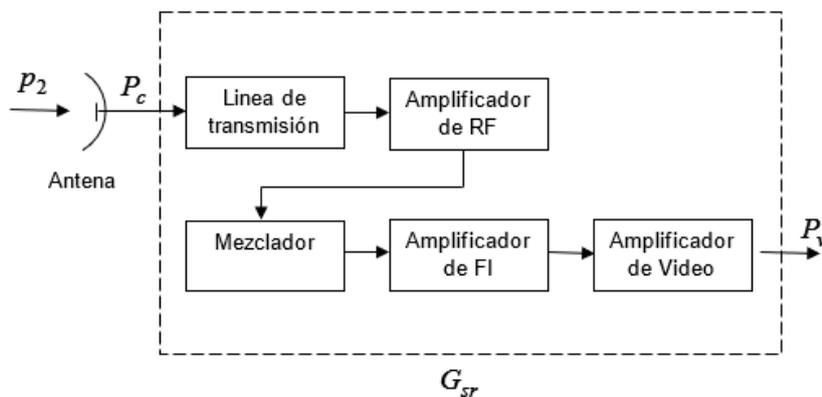


Figura 6: Diagrama de bloques del receptor del radar.

De (8), dados un radar y una altura de la antena, para cada valor de la distancia se obtiene el valor medio de la SERDE. Esta ecuación es la base del algoritmo para la estimación de la SERDE [12] que a continuación se propone:

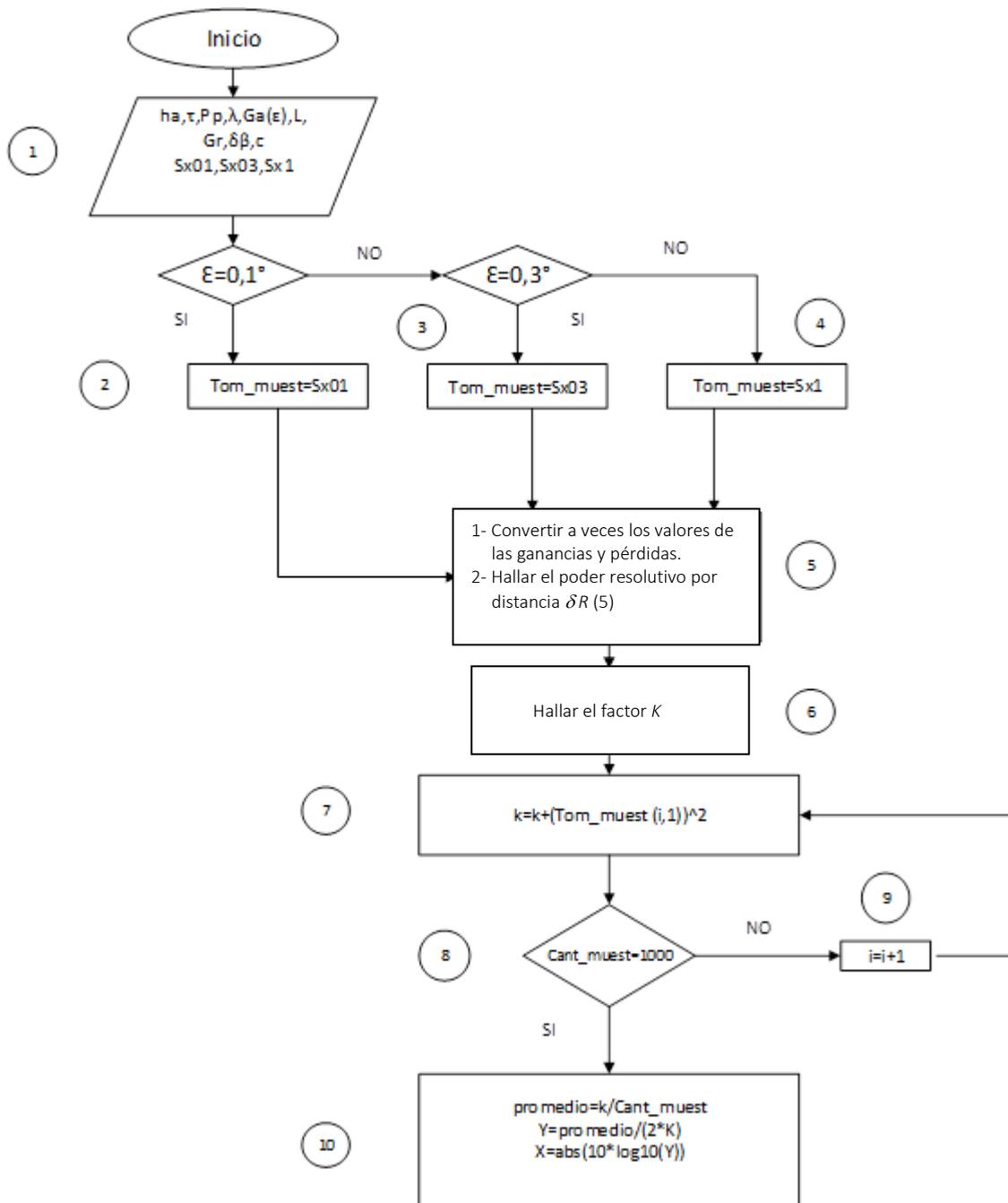


Figura 7: Diagrama de bloques del algoritmo para la estimación del estado de la mar (bloques 1 al 10)

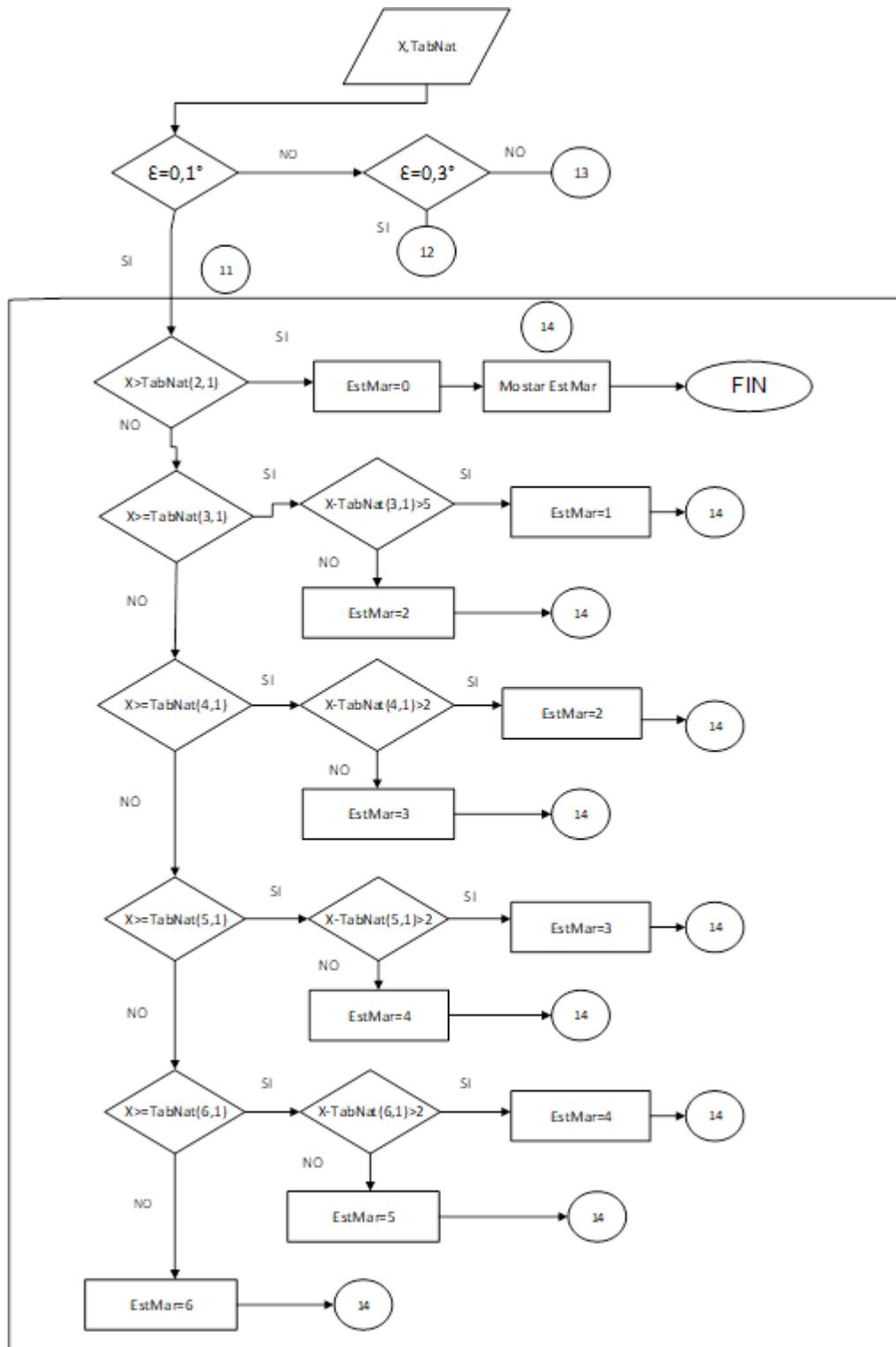


Figura 8: Diagrama de bloques del algoritmo para la estimación del estado del mar (bloques 11 – 14). Se muestra sólo el bloque 11. El procedimiento es similar para el resto de los bloques.

OPERACIONES INDICADAS EN EL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO

1- Condiciones iniciales:

2- Si el ángulo de rasancia es igual a $0,1^\circ$ se trabajará con las muestras de la señal $Sx01$.

3- Si el ángulo de rasancia es igual a $0,3^\circ$ se trabajará con las muestras de la señal $Sx03$.

4- En caso de que el ángulo de rasancia no sea igual $0,1^\circ$ ni a $0,3^\circ$, pues entonces significa que su valor es de 1° , por lo que se trabajará con las muestras de la señal $Sx1$.

5- Una vez definida la señal con la cual se trabajará, se deben convertir a veces los valores de las ganancias y pérdidas del sistema, además hallar el poder resolutivo por distancia (δR), el cual depende del tamaño del pulso y la velocidad de la luz, como se expresó en la ecuación (3.13).

6- Se procede a calcular el factor K .

7,8,9- En estos bloques se observa el proceso de muestreo, se toman las muestras de la señal con la que se esté trabajando de una en una, pues todas son independientes. Cada muestra se eleva al cuadrado y se guarda el valor en el vector k . Este proceso se repite hasta un número de muestras igual a mil.

10- Al llegar a las mil muestras se halla el promedio de esas muestras elevadas al cuadrado, ese promedio se divide entre dos y se normaliza por el factor K . Este resultado se lleva a dB, y se obtiene el valor de la SERDE, el cual en el algoritmo está representado por X . Obtenido el valor de la SERDE, se procede a buscar en las Tablas de Nathanson a qué estado del mar pertenece este valor. En el programa se ha confeccionado una tabla con los valores de la SERDE de las Tablas de Nathanson para estos ángulos de rasancia. En las figuras 5 y 6 se muestra el algoritmo desarrollado para dicha búsqueda. A continuación, se presenta la función de cada bloque. Se toman como valores iniciales el valor de la SERDE obtenido y la tabla en donde se encuentran los valores de SERDE para los diferentes estados de la mar llamada *TabNat*. Esta tabla fue construida con los valores de la SERDE de las Tablas de Nathanson para ángulos de rasancia de $0,1^\circ$, $0,3^\circ$ y 1° , polarización horizontal y banda X, y tiene 7 filas y 3 columnas.

11- En caso de que el ángulo de rasancia sea de $0,1^\circ$ se procede a trabajar con la primera columna de *TabNat*, donde se busca en qué intervalo se encuentra el valor de la SERDE que se obtuvo anteriormente, una vez encontrado el intervalo, se procede a ver cuál es la diferencia entre la SERDE y los valores extremos de dicho intervalo, de esta manera se hace una aproximación y se define a qué estado del mar pertenece el valor de la SERDE obtenida.

12- En caso de que el ángulo de rasancia sea de $0,3^\circ$ se procede a trabajar con la segunda columna de *TabNat*, donde se busca en que intervalo se encuentra el valor de la SERDE que se obtuvo anteriormente, una vez encontrado el intervalo, se procede a ver cuál es la diferencia entre la SERDE y los valores extremos de dicho intervalo, de esta manera se hace una aproximación y se define a qué estado del mar pertenece el valor de la SERDE obtenida.

13- En caso de que el ángulo de rasancia no sea de $0,1^\circ$ ni de $0,3^\circ$, pues entonces su valor es de 1° , se procede a trabajar con la tercera columna de *TabNat*, donde se busca en qué intervalo se encuentra el valor de la SERDE que se obtuvo anteriormente, una vez encontrado el intervalo, se procede a ver cuál es la diferencia entre la SERDE y los valores extremos de dicho intervalo, de esta manera se hace una aproximación y se define a qué estado del mar pertenece el valor de la SERDE obtenida.

14- Una vez definido el estado del mar al cual pertenece el valor de la SERDE, se procede a mostrar dicho resultado en la interfaz del programa.

6. SIMULACIÓN DEL ESTIMADO DEL ESTADO DEL MAR

El software empleado [12] para la creación de la interfaz fue MATLAB R2020a. Se emplearon los datos correspondientes al radar SBS – 700, los cuales se dan en la Fig.7, asumiéndose detector cuadrático. Se tomó como muestra del clutter marino, una de tamaño 1000 con la intensidad del clutter distribuida por la ley de Rayleigh (Swerling 1) con varianza $\sigma = 2,4 \times 10^{-6}$. Como resultado se obtuvo un EM = 2, que concuerda con el resultado de obtener el valor de la potencia media a la salida de la etapa de video del receptor aplicando (8).

Tipo de Radar: SBS-700

Parámetros del Radar

Ganancia de potencia de la antena [Ga(ε)]=30 dB

Ganancia del receptor [Gr]=50 dB

Altura de la antena [ha]=36 m

Pérdidas [L]=16 dB

Potencia de sondeo del radar [Pp]=25 kW

Longitud de onda[λ]=0.03 m

Poder resolutivo por azimut [δβ]=2°

Tamaño del pulso [τ]=0.25 us

Ángulo de rasancia [ε]

0.1° 0.3° 1°

Obtener estado de la mar

2

Salir

Figura 9: Resultado de la ejecución del programa para un ángulo de rasancia de 0.1°

7. CONCLUSIONES

Los métodos de cálculo para predecir la zona de visibilidad o cobertura de radar, que aparecen en la literatura especializada, tienen como referencia la SERDE y no el estado del mar. En opinión de los autores de este trabajo, esto se debe al hecho de que los experimentos realizados para obtener los valores de la SERDE, al menos los que aparecen en la literatura abierta, no permiten hacer la predicción, tomando el estado del mar como parámetro explícito de referencia, para las regiones específicas de interés, pues aunque las tablas de Nathanson, hasta el presente, constituyen la referencia obligada para relacionar la SERDE con el estado del mar, las mismas dan una información muy general. En este artículo se toma el estado del mar como parámetro de referencia, para fundamentar que, elaborando tablas semejantes para regiones de interés, llevando a cabo experimentos precisos, sería de gran utilidad práctica predecir la cobertura de radar tomando como referencia el estado del mar.

Conjuntamente con la predicción de la cobertura, la elección óptima de la ubicación del radar es de gran importancia para garantizar la buena calidad de la observación de la superficie marina. Esta ubicación óptima se puede elegir, a partir de un estudio realizado previamente a la instalación del radar o de forma dinámica, ante la necesidad de una elección rápida del emplazamiento, garantizando la cobertura para el máximo valor del área de la superficie iluminada por el radar, en cuyo caso el método propuesto es de gran utilidad práctica. Lo propuesto para estimar el estado del mar permite independencia de los medios usuales que brindan esta información, lo cual representa también utilidad práctica, en particular para la seguridad de la navegación marítima. Lo presentado en este trabajo puede despertar el interés de desarrollar experimentos, para obtener los datos estadísticos del estado del mar en regiones de interés especial, con el objetivo de poder elevar la calidad de la observación por radar de los blancos navales o a baja altura en las mismas.

REFERENCIAS

- [1] N. Chávez, A. De Vicente, A; P. Pérez, << Sistema para la simulación y determinación automatizada de las zonas de visibilidad de radar y de visibilidad directa en el territorio de Cuba >>, Centro Nacional de Derechos de Autor, CENDA, 2479 – 2005, La Habana, Nov. 2005.
- [2] E. Marín, << Evaluación de la cobertura y la precisión de los sistemas de vigilancia aeronáutica por multilateración para cualquier región del territorio de Cuba >>, Tesis de Maestría, tutor: Nelson Chávez, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, 2017.
- [3] D. Álvarez, N. Chávez, << Predicción y simulación de las zonas de visibilidad de radar en 3D, en el territorio de Cuba >>, Telemática 13 (3) : 75 – 85, 2014.

- [4] L. Wang, X. Jiang, <<An improved radar detection rangeplotting method based on radar equation >>, *En actas de International Conference of Machine Learning and Cybernetics*, 2011.
- [5] K.D. Ward, R.I. Tough, S. Wats, << Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance >>, IET Radar, Sonar and Navigation Series, London, UK 2006, pp 229 – 264, 229 – 265.
- [6] J. Briggs, <<Target Detection by Marine Radar >>, IET Radar, Sonar and Navigation Series, London, UK 2006, pp453 – 520.
- [7] P. Jarabo, P. Mata, D. Hessner, K. Nieto << Signal – to – noise ratio análisis toe stimate ocean wave heights from X band marine radar image time series, >>, IET Radar, Sonar and Navigation Series, vol. 2, No 1, pp 35 – 41, feb. 2008.
- [8] F.E. Nathanson, J.P. Reilly, M.N. Cohen, << Radar Design Principles. Signal Processing and the Environment >>, SCITECH Publishing Inc., New Jersey, 1999, pp 274 – 278.
- [9] V. Gregers, V. Hansen, R. Mital, <<An empirical sea clutter model for low grazing angles>>, Radar Division, Naval Research Laboraory, Washington, 978 – 1 – 4244 – 2871 – 7/09, 2009.
- [10] I. Konuganti, I. Chowdary, M. Volamathi, << Sea clutter modelling and target detection>>, International Journal of Computer Applicationstion, National Conference”Electronics, Signals, Communication and Optimization”, 2015.
- [11] L. La Ó, << Elección óptima de la ubicación de un radar de costa para el criterio de máxima zona de visibilidad >>, Tesis de diploma, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, 2021.
- [12] D. Santana, << Estimación por radar del estado del mar >>, Tesis de diploma, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, 2021

9. SOBRE LOS AUTORES

Nelson Chávez Ferry: Profesor del Departamento de Telecomunicaciones y Telemática de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE; Profesor Titular, Consultante. Ingeniero en Telecomunicaciones, Doctor en Ciencias Técnicas y Doctor en Ciencias. Miembro del Consejo Científico del Departamento de Telecomunicaciones y Telemática de la CUJAE. ORCID: 0000 – 0001 – 6588 – 9092.

Giorgia Rodríguez Almaguer: Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica; Profesora del Departamento de Telecomunicaciones y Telemática de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE.; Instructora, miembro del Grupo de Investigación de Radar.

Lena Lizbet La Ó Ramírez: Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica, Colaboradora del Grupo de Investigación de Radar, Adiestrada - Empresa Eléctrica de Matanzas, Cuba.

Dayron Manuel Santana García: Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Colaborador del Grupo de Investigación de Radar, Adiestrado - ETECSA, Cuba.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses de los autores o de las instituciones a las cuales pertenecen con relación al contenido de este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Autor 1: Idea, Conceptualización, preparación y desarrollo del artículo, revisión y aprobación versión final a publicar. (50%)

Autor 2: Contribución a la idea, al desarrollo del artículo y a su organización. Revisión de las versiones. (20%)

Autor 3: Contribución a la idea y al desarrollo del artículo. Búsqueda de referencias. (15%)

Autor 4: Contribución a la idea y al desarrollo del artículo. Búsqueda de referencias. (15%)

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

