



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL  
EJÉRCITO  
ESPE – LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E  
INSTRUMENTACIÓN**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**ANÁLISIS, ESTUDIO Y SIMULACION DE LOS  
PARÁMETROS DEL RADAR EN EL PROGRAMA  
MATLAB**

**LUIS ALDAZ SANTANA**

Latacunga-Ecuador

2005

## **CERIFICACION**

Certificamos que el presente documento fue elaborado por el señor

Luis Hernán Aldaz Santana

Bajo nuestra dirección, como un requisito para la obtención de un título de Ingeniero en Electrónica en Instrumentación.

Ing. Eddie Galarza

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Armando Álvarez

CODIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más profundo agradecimiento a Dios, a mis difuntos padres Vidal Aldaz y Emperatriz Santana, a mi querida esposa Mónica, mis hijos y hermanos, quienes con su incondicional apoyo fueron el puntal fundamental para culminar con éxito mi carrera de Ingeniería.

A mi Director de tesis Ing. Eddie Galarza y Codirector Ing. Armando Álvarez e Ing. Nancy Guerrón, a todos los señores profesores que en los diferentes niveles fueron mis instructores quienes con su desinteresada amistad y valiosos consejos ayudaron para el desarrollo del presente Proyecto

**Luis Hernán Aldaz Santana**

## **DEDICATORIA**

Con profunda veneración dedico este trabajo a mis padres Vidal y Emperatriz, quienes me dieron la luz de la vida y que con su ejemplo y sacrificio y trabajo me enseñaron a seguir por el sendero del bien en especial a mi madre que en estos últimos seis años (06) Dios me dio la oportunidad de vivir con ella y que en los momentos más difíciles me extendió su mano para levantarme en las caídas.

A mi esposa que con su voz de aliento me apoyo siempre para seguir adelante; quien supo demostrar y sacrificar el tiempo en el hogar durante mi ausencia, tiempo que debí emplear para lograr mi carrera con éxitos, a mis hijos María Luisa, Luis, Diana y Carlos que también fueron mi inspiración para seguir avanzando y lograr este objetivo; a quienes quiero legarles este trabajo para que lo tomen como ejemplo en sus vidas

**Luis Hernán Aldaz Santana**

# INDICE

## CAPÍTULO I

1.1	Introducción e Historia del Radar.....	1
1.2	Los Origenes del Radar.....	2
1.3	Descripción de los componentes del Radar.....	7
1.3.1	Trasmisor.....	7
1.3.2	Klistron.....	8
1.3.3	Compresión de pulso.....	9
1.3.4	Receptor del Radar.....	10
1.3.5	Ruido en el Receptor.....	13
1.4	Procesamiento de la señal.....	15
1.4.1	Clutter (ruido exterior).....	15
1.4.2	Efecto Doppler y Detección de Blancos en Movimiento.....	15
1.4.3	Coherencia del sistema.....	17
1.4.4	Detector de fase Sensitivo (PSD).....	17
1.4.5	Perdida o desvanecimiento de fase (Phase Fading).....	17

1.4.6	Desvanecimiento	
	Tangencial.....	18
1.5	Indicador de Blancos Móviles (MOVING TRAGET INDICATOR	
	MTI).....	19
1.5.1	Procesamiento de salida de	
	video.....	20
1.6	Displays del	
	Radar.....	22
1.7	Radar	
	Secundario.....	24
1.8	Extracción de	
	Plots.....	28
1.9	Clasificación de los	
	Rdares.....	30
1.9.1	Aplicación de los sistemas de Radar.....	33

## **CAPÍTULO II**

2.1	Pérdidas del Radar.....	34
2.1.1	Pérdidas en la detención del Rdar.....	34
2.1.2	Pérdidas en el transmisor y receptor.....	34
2.1.3	Pérdidas en el lovulo y en el barrido de la antena.....	34
2.1.4	Pérdidas atmosféricas.....	35
2.1.5	Colapso de pérdida ( COLLAPSING LOSS).....	36
2.1.6	Pérdidas en el procesamiento de señales.....	36
2.1.7	Otras pérdidas.....	37

2.18	Análisis de la propagación de la onda electromagnética del Radar.....	37
2.2	Atmosfera	
	terrestre.....	38
2.2.1	Geometria de la atmosfera terrestre.....	39
2.2.2	Refracción.....	
.....		40
2.2.3	Refractividad.....	41
2.2.4	Reflección del terreno.....	42
2.2.5	Divergencia.....	42
2.2.6	Rugosidad del terreno.....	43
2.3	Ecuación del Radar.....	43
2.3.1	Sección del cruce del Radar.....	44
2.4	Análisis del calculo del PRF.....	51
2.5	Resolución del rango.....	60

### **CAPITULO III**

3.1	Arreglo de antena.....	64
3.2	Campos cercanos y lejanos.....	65
3.3	Tipos de arreglos.....	66
3.3.1	Arreglos lineales.....	67
3.3.2	Arreglo planal.....	78
3.3.3	Arreglo circular de grilla.....	78
3.3.4	Arreglo rectangular.....	86

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN E HISTORIA DEL RADAR

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El Radar es un sistema electrónico que permite detectar objetos y determinar la distancia a que se encuentran proyectando sobre ellos ondas de radio que son reflejadas por el objeto y que al ser recibidas de nuevo por la antena del radar permiten calcular la distancia a la que se encuentra el objeto, en función del tiempo que tardó en ir y volver la señal de radio.

De acuerdo al conocimiento natural o instintivo que muchos poseemos sobre algunos inventos creados en el presente siglo, si alguien nos pregunta ¿quién inventó el Radar?, uno también instintivamente contesta, “los ingleses durante la Segunda Guerra Mundial” lo anterior, si bien no se aleja mucho de la realidad, carece de precisiones científicas, que podría ser interesante aclarar, en el ambiente del empleo en radares de Defensa Aérea, el cual debe mucho de su progreso, en especial en la parte táctica al desarrollo de este ingenio electrónico. Es por eso que he querido recopilar cierta información, que a mi mismo me aclaró muchas dudas, por esta razón he de ampliar la información en relación la historia del radar.

De todos, es conocida la utilización del radar en el control del tráfico aéreo y en el control policial de la velocidad en el tráfico rodado. Además, estos están siendo utilizados en sistemas especiales que permiten formar, mediante un elaborado procesamiento de la señal radar, imágenes de la superficie planetaria con resoluciones del orden de algunos metros. Las aplicaciones potenciales de estos sistemas son innumerables: cartografía de zonas de alta nubosidad (inaccesibles mediante sensores ópticos), obtención de modelos topográficos a escala mundial de alta precisión, exploración de otros planetas o satélites con atmósfera, determinación de recursos hídricos, vegetación, clasificación de cultivos, etc.

El trabajo presentado a continuación presenta una visión detallada de lo que es "Un Sistema de Radar", el principio de funcionamiento de estos, los tipos existentes y analizar e implementar programas de cálculos matemáticos y gráficas de los parámetros para diseñar un radar, que permitirán adentrarnos en tan importante campo de investigación, a fin de obtener una herramienta computacional que facilite a los usuarios y personas tomar decisiones acertadas, en la grave responsabilidad de decidir en la implementación de un sistema de Defensa Aérea o de Control de Tráfico Aéreo.

Los parámetros del radar serán analizados desde el punto vista matemático y físico, para luego utilizando el programa computacional MATLAB, crear subprogramas que permitan simplificar y facilitar los cálculos y gráficas

### 1.2 LOS ORIGENES DEL RADAR

El concepto básico de radar, fue por primera vez demostrado mediante los clásicos experimentos conducidos por el físico alemán Heinrich Hertz desde 1885 a 1888. Hertz experimentalmente verificó las predicciones de la teoría del campo



electromagnético de James Clerk Maxwell, publicado en 1864. Hertz utilizó un aparato que fue similar en principio a un radar de pulsos, en frecuencias cercanas a los 455 MHz. y demostró que las ondas de radio se comportan de la misma manera como lo hace la luz, excepto por la considerable diferencia en frecuencia entre las dos.

Hertz mostró que las ondas de radio podían ser reflejadas desde objetos metálicos y refractado por un prisma dieléctrico, con cuyo trabajo recibió un rápido y amplio reconocimiento, sin embargo, él no persiguió su aplicación práctica. Esto le fue dejado a otros. El potencial del trabajo de Hertz para la detección y ubicación de objetos reflejados que es lo que básicamente un radar hace, fue llevado a cabo por otro alemán, Christian Hulsmeyer. Al inicio de los años 1900, Hulsmeyer ensambló un instrumento que hoy día sería conocido como un monoestático (un solo sitio) radar de pulso. Éste fue mucho más mejorado que el aparato usado por Hertz. En 1904 obtuvo una patente en Inglaterra y otros países. El radar de Hulsmeyer detectaba barcos, y fue extensamente publicitado en el mercado, para prevenir colisiones en el mar. El demostró el funcionamiento de su aparato a compañías navieras y a la Armada Alemana. Aunque fue un éxito y muy publicitado, no existió aparentemente interés para ser utilizado como un dispositivo que permita evitar las colisiones en el mar. Su invención y sus demostraciones desaparecieron de la memoria y todas ellas paradójicamente, fueron olvidadas. El radar tendría que ser redescubierto por varias oportunidades más, antes de que eventualmente se convierta en una realidad operacional.

Durante los años 1920 otras evidencias del método del radar aparecieron. S.G. Marconi , el muy bien conocido pionero de la radio inalámbrica, observó la detección por radio de blancos en sus experimentos, y fuertemente urgió su uso, en un discurso pronunciado en 1922 para el Instituto de Ingenieros de Radio (ahora el IEEE por sus siglas en inglés).

En 1925, la técnica de radar de pulso fue utilizada por Breit y Tuve del Instituto Carnegie en Washington, D.C. para medir la altura de la ionósfera. Los aparatos de Breit y Tuve fueron en verdad un radar, pero no fue reconocido como tal, el mismo principio, podía haber sido aplicado para la detección de barcos y aeronaves.

Fue durante el apareamiento de los bombarderos militares pesados al final de los años 1920 y comienzos de los 1930, que eventualmente surgió el radar operacional con fines militares. Después de la I Guerra Mundial, el bombardero fue transformado de un biplano recubierto de lona con una cabina abierta, en un aeroplano metálico de ala fija con una cabina de mando cerrada, que volaba a niveles altos y a grandes distancias con una pesada carga de bombas.

La alarma temprana sobre la aproximación de pesados bombarderos, se convirtió en una importante necesidad militar. En la mayoría de los países que respondieron a esta amenaza, los posibles métodos de detección examinados, fueron similares no obstante, los desarrollos y adelantos estuvieron cubiertos de secretismo. Los localizadores de sonido fueron los primeros sensores a ser examinados. Ellos fueron emplazados en muchos ejércitos hasta empezar la II Guerra Mundial aunque se reconoció mucho tiempo atrás lo inadecuado de estos equipos para la tarea en cuestión.

En los años 1930, el radar fue redescubierto y desarrollado casi simultáneamente y esencialmente independientemente en los Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Unión Soviética, Francia, Italia, Japón y Países Bajos.

Estos radares, operaron en frecuencias mucho más bajas que aquellas generalmente usadas en los modernos radares. La mayoría de los primeros radares empleaban frecuencias cercanas a los 100 y 200 MHz.; pero los radares de la cadena británica de defensa (British Chain Home) operaban en 30 Mhz., el final bajo del espectro de frecuencias de los radares de la pre-guerra, mientras los radares Wursburg de 600 MHz. de Alemania, representaban la utilización de las frecuencias mas altas usadas operacionalmente en los inicios de la guerra. Las tecnologías utilizadas en estos primeros radares, fueron en su mayoría audaces extensiones de ellos, tecnología preeminente del campo de las radio comunicaciones. Comparado con los radares de microonda, ellos tenían algunas limitaciones, pero llevaron a cabo su pretendido trabajo en forma adecuada.

El elemento más importante en la creación del radar fue la invención del magnetrón de cavidad de microonda de alta potencia la cual fue creada en la Universidad de Birmingham en Inglaterra a comienzos de la II G.M.. El magnetrón dramáticamente cambió la naturaleza del radar como existía hasta ese momento, permitiendo el desarrollo de los radares con antenas pequeñas, que podían ser transportadas en buques y aeronaves, y mediante sistemas móviles de tierra. La mayoría de los países involucrados tempranamente en la investigación de radares, reconocieron la importancia de obtener alta potencia en frecuencias de microonda, y trataron de que el magnetrón convencional tuviera alta potencia, pero fueron los ingleses quienes tuvieron éxito y aseguraron su uso en un radar operacional. El Laboratorio de Radiación MIT fue organizado por los Estados Unidos en el otoño de 1940 para dedicarse al desarrollo del radar de microonda, basado en el uso del magnetrón inglés. Los americanos fueron altamente exitosos en la aplicación de la nueva tecnología en microonda para el radar militar por aire, tierra y por mar. El Laboratorio Radiación desarrolló mas de 100 sistemas radáricos diferentes durante los años de la guerra para tales propósitos, como alarma temprana de ataques aéreos, control de fuego antiaéreo, interceptación aérea, bombardeo a ciegas, y detección de buques y unidades de superficie.

Durante la segunda Guerra mundial, la tecnología radárica y sistemas crecieron rápidamente, pero había aún mucho por hacer. En los años que inmediatamente siguieron a la guerra, el desarrollo del radar fue principalmente concentrado en las cosas que no se completaron durante la guerra. Desde ese momento, la capacidad del radar había continuado en avance. La siguiente es una lista de algunos de los logros principales del radar:

El uso del efecto Doppler en radar de pulsos MTI (Indicación de Blancos Móviles, por sus siglas en inglés) fue perfeccionado para separar los blancos deseados de aeronaves de los grandes ecos de tierra no deseados.

Amplificadores altamente estables como el klystron, tubo de onda viajera (TWT, por sus siglas en inglés), y transistores de estado sólido que han permitido una mejor aplicación del efecto Doppler, el uso de formas de onda sofisticadas, y potencias mucho más altas que las que pudiere obtenerse con un magnetrón.

Traqueo en un ángulo muy exacto de blancos, se ha hecho práctico con los radares monopulso.

La compresión de pulso ha permitido el uso de formas de onda largas para obtener alta energía, y simultáneamente se ha alcanzado la resolución de un pulso corto por medio de una modulación interna de un pulso largo.

El radar de apertura sintética aerotransportado (SAR) ha provisto imágenes de mapas de alta resolución, de escenas de superficie.

Los radares aerotransportados que utilizan métodos de procesamiento Doppler, hicieron posible los radares de pulso Doppler y MTI aerotransportados, que fueron capaces de detectar aeronaves en medio de clutter altamente intenso.

La antena plana, o arreglo planar guiado electrónicamente ofreció un control rápido del haz de radiación sin movimiento mecánico de la antena.

El radar HF (OVER-THE- HORIZON- RADAR, por sus siglas en inglés) ha extendido su rango de detección para aeronaves por un factor de diez, a casi 2000 NM (Millas Náuticas).

El radar se ha convertido en algo más que un detector de “manchas” o puntos en el espacio, mediante la extracción de información de los ecos o señales, para proporcionar la identificación o reconocimiento de aeronaves.

El radar se ha transformado en una importante herramienta para los meteorólogos y como una ayuda para la seguridad y un eficiente viajero aéreo, mediante la observación y medición de precipitaciones, advertencia sobre peligrosas tormentas y otras condiciones meteorológicas de alta peligrosidad, y finalmente para proporcionar oportunas mediciones de los perfiles verticales de la velocidad del viento y dirección.

Los rápidos avances en tecnología digital, han hecho posible que muchas capacidades teóricas, se conviertan en prácticas, con el procesamiento de señales digitales y con el procesamiento de la información digital.

Las nuevas tecnologías, técnicas y aplicaciones para el radar han alimentado el continuo crecimiento de estos sistemas, desde su inicio en los años 1930. El crecimiento del radar está en proceso y se espera que continúe así. Algunos de estos, tales como radares de vigilancia de aeropuertos y los equipos de detección de superficie de aeropuertos, podrían ser conocidos, puesto que son visibles en los aeropuertos principales.

Otros sistemas mostrados aquí, no son muy usuales de verse y están incluidos para indicar la diversidad de medios que se encuentran en sistemas radáricos.

### **1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL RADAR**

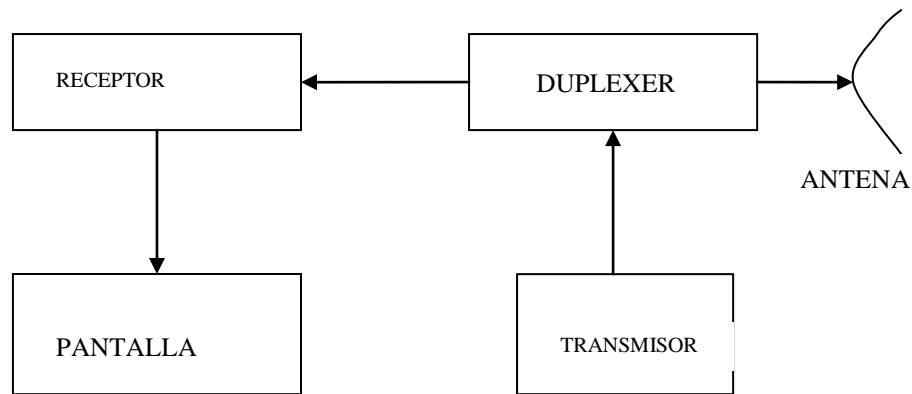


Figura 1.1 Diagrama básico de un radar

### 1.3.1 TRANSMISOR

El transmisor; debe ser capaz de generar y transmitir un corto, pero muy potente pulso de energía tipo microonda, y debe tener la capacidad de lanzar esta energía hacia el alimentador (FEEDER) de la antena.

Los transmisores de radar usan válvulas altamente especializadas, muy diferentes a las de sus predecesores, de las cuales comúnmente se encuentran las siguientes:

### 1.3.2 EL KLYSTRON

Es otro tipo de dispositivo de microonda de alta potencia, sin embargo, tiene una celdilla de control, y puede ser controlado como un tródo. Los electrones del cátodo calentado forman un fuerte haz el cual es concentrado por magnetos. El haz es atraído por el ánodo, pero su nombre ahora cambia a “colector”.

El klystron es un amplificador de microonda y no oscila por sí mismo como lo hace el magnetrón, por lo que es necesario de una señal que es alimentada a

la entrada de la cavidad, la cual es capaz de modular el haz de electrones en un espacio de interacción.

También existe otro tipo de válvulas como la TWT (Travelling Wave Tube) utilizada como amplificador de microonda en señales de RF.

Todos los transmisores están compuestos por una fuente de poder, un modulador y un sistema de microonda.

Una de las características en el diseño de los transmisores es el monitoreo de todas las señales que se producen, lo que permitirá asegurarse de que por la gran cantidad de altos voltajes que se manejan, se evite el daño de los componentes, protegiéndolos con dispositivos de seguridad, enclavamiento y control.

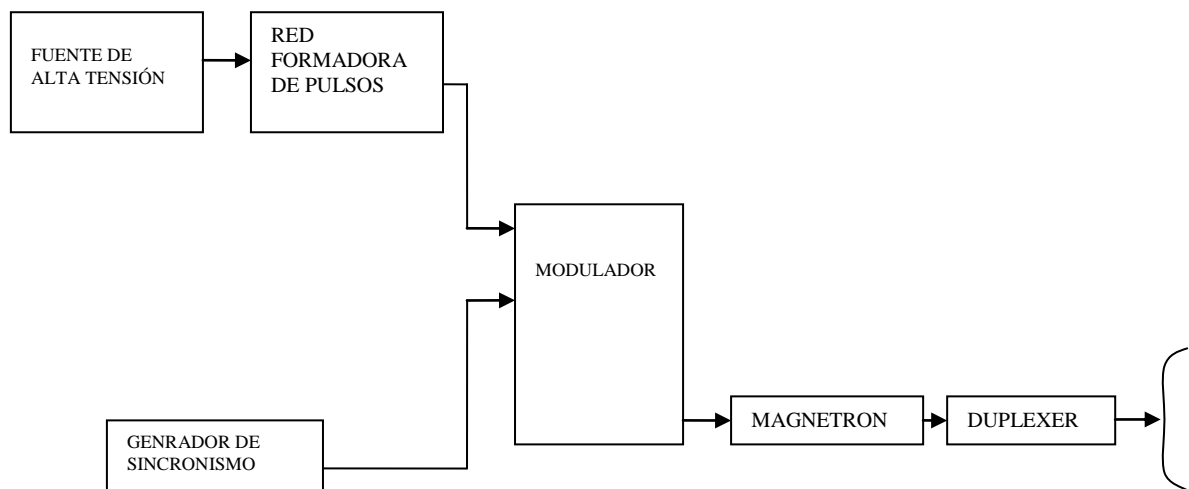


Figura 1.3 Diagrama del transmisor



Figura 1.4 Gráfico Compresión de Pulso

### 1.3.2 COMPRESIÓN DE PULSO

Uno de los interesantes desarrollos del radar en décadas recientes, es la compresión de pulsos. Esta característica ha hecho posible que los ingenieros reduzcan la enorme potencia pico de salida de los transmisores, por niveles relativamente pequeños de potencia.

Una de las características clave de la compresión de pulso, radica en que el pulso transmitido se hace en frecuencia modulada, como el ejemplo presentado en la gráfica No. 1.4, la modulación es muy precisa y por cada incremento de ancho de pulso, una frecuencia correspondiente es definida. El pulso de salida es mucho más grande que en un sistema no comprimido. (ejemplo: 20  $\mu$ S vs. 1  $\mu$ S).

El receptor tiene la habilidad de lidiar con cada parte del eco recibido separadamente, de extraerlo, retardarlo, y adicionarlo a la siguiente parte del eco recibido. Si puede hacer esto, digamos cada microsegundo, el pulso de 20  $\mu$ S debería terminar únicamente con un ancho de 1  $\mu$ S, pero veinte veces más grande en amplitud (13dB).

Las ventajas de la compresión de pulso son claras, y por lo tanto, en años recientes los transmisores de radar necesitan ser únicamente una fracción de la potencia de sus predecesores.

La cantidad que el pulso es comprimido se conoce como **la relación de compresión**, para un radar de 60NM (Millas Náuticas) de rango, este va desde 20  $\mu$ S a 0.5  $\mu$ S (40:1, o 16 dB).

### 1.3.4 RECEPTOR DEL RADAR

Quizás, el hecho más asombroso acerca de sistemas radáricos, es la increíble sensibilidad de los receptores del radar, y el rango sobre el cual ellos son requeridos que ejecuten su trabajo.

Los sistemas radáricos, son frecuentemente citados en términos de “**señal discernible mínima (por sus siglas en inglés MDS)**”. Ésta es una medida de la señal más pequeña posible, la cual puede aún ser vista en la pantalla del radar ,como un blanco. Sistemas de recepción modernos con compresión de pulso están en capacidad de detectar señales en orden de **-130dBm**, ésta es igual a  $1/10^6$ W (una décima de femtovatio), que básicamente es **diez mil millonésima de un vatio** (0,0000000000000001), esta cantidad realmente no puede ser medida, (sin embargo, existen equipos con el cual se puede medir hasta -70dBm).

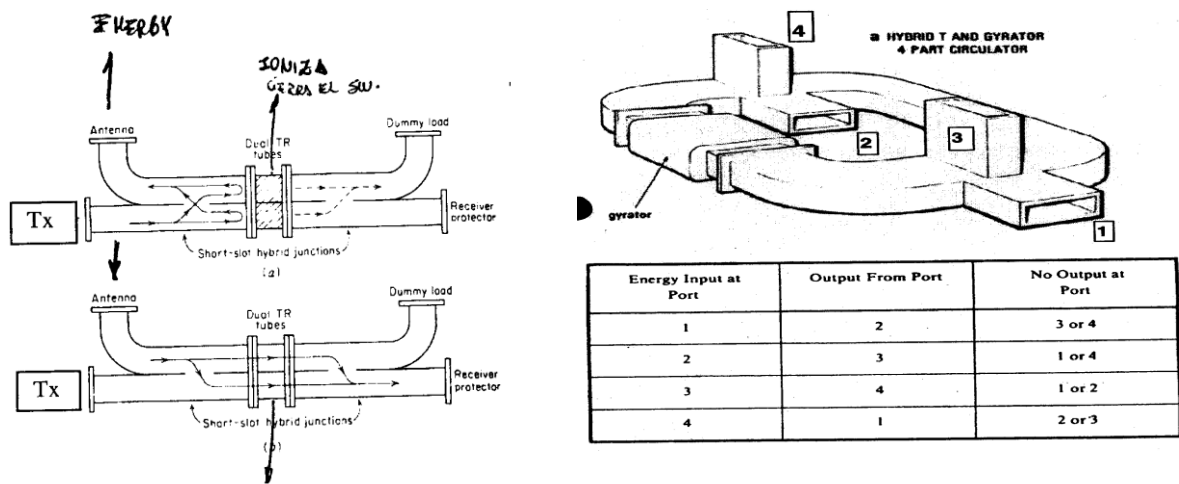


Figura 1.5 Duplexers y Circuladores

Luego de haber producido las señales de transmisión y de recibir los ecos que regresan al radar, se presenta la dificultad de separar esta dos señales que ingresan por el mismo camino que las guías de onda para esto, en los primeros sistemas, las antenas de transmisión y recepción estuvieron separadas, los receptores podían resistir el pulso de transmisión y los ecos muy fuertes recibidos a distancias cortas. En la actualidad se utiliza el mismo sistema de guías de onda, con el empleo de un duplexer, para enviar y recibir la misma señal, la cual no permite que la señal de alta frecuencia y alta potencia ingrese al receptor.

La energía microonda desde el transmisor, impacta las **celdas TR (Transmisión/ Recepción)** que ioniza y la vuelve conductiva como una luz de neón. La energía puede reflejar desde las celdas ionizadas y retornar vía el acoplador de guía de onda, a la antena, cuando el pulso de transmisión ha finalizado, la celda TR retorna a su posición normal y se vuelve “transparente”, los ecos recibidos pueden ahora pasar a través de las celdas TR y acoplarse al receptor.

Desafortunadamente, toma poco tiempo a las celdas TR la ionización por que podría ocurrir una fuga o pico de energía y pasar a través del receptor, por tal razón es

necesario utilizar otra celdilla mas sensitiva en estado sólido, que simplemente actúa para bloquear la fuga o pico de energía y no tiene efecto sobre los ecos.

También existe el circulador, que es un tramo de guía de onda que de alguna manera puede existir una fuga de energía hacia el dentro del receptor. Ante esta dificultad, se emplea una unidad protectora del receptor de segundo nivel, justo antes del pre-amplificador del radar. El protector de recepción es altamente crítico y de diseño marginal. De igual forma, es usual tener más celdillas TR en la parte frontal del protector, que está normalmente diseñado como un dispositivo guía de onda.

Siguiendo las celdas TR, está un conductor corto a través del cual las señales se retardan. Conectado a lo largo del conductor, en puntos estratégicos se encuentran los dispositivos semiconductores, conocidos como diodos PIN. El otro extremo de los diodos PIN, está conectado a tierra. Los diodos en mención tienen una senda por la que cruzan, que puede ser controlada por una compuerta interactuadota, la compuerta es activada por una fuerte fuga de RF, la cual conectará los diodos PIN y consecuentemente las conectará a tierra, corto circuitando la energía. Cuando los niveles de energía son suficientemente bajos, los diodos PIN son encendidos y las señales (ecos) pueden pasar a través, sin impedimento.

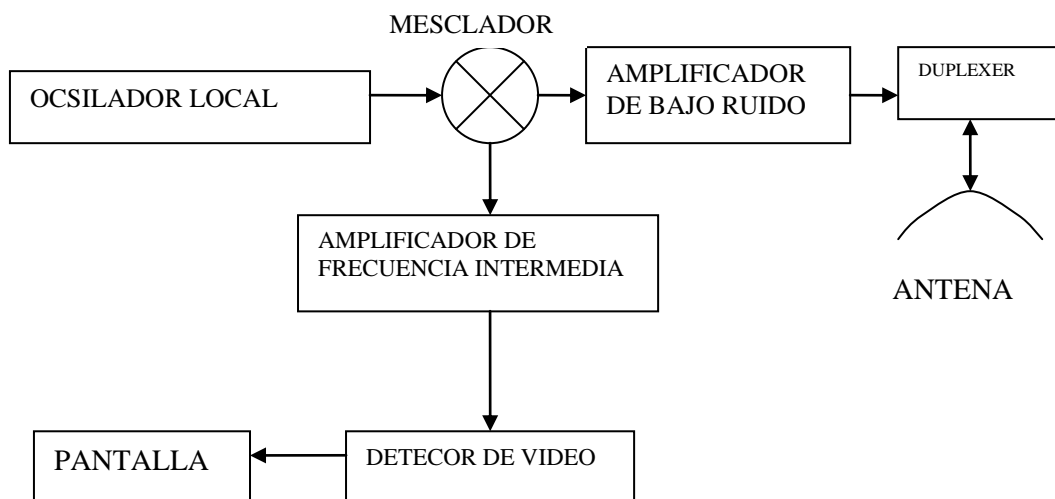


Figura 1.6 Diagrama básico del receptor

### 1.3.5 RUIDO EN EL RECEPTOR

Las señales radar son extremadamente pequeñas, y requieren ser amplificadas. Ha sido siempre difícil amplificar las señales en frecuencias RF. Las señales de baja frecuencia sin embargo, pueden ser amplificadas más rápidamente, de tal forma que la mayoría de la ganancia o amplificación de un receptor de radar, es realizado a una frecuencia intermedia (i.f.) más baja. Para



producir la frecuencia intermedia es necesario pasar por un proceso de conversión, primero se realiza la conversión de baja frecuencia (**down-convert**), de 3 Ghz. a una frecuencia intermedia de aproximadamente 500Mhz, y luego por otro conversor a 70 Mhz.. Este proceso es conocido como **heterodino**.

El ancho de banda de un receptor determina cuanta potencia de ruido estará presente. Lógicamente, mientras el estrechamiento del ancho de banda del receptor es mayor, el ruido abarcado dentro de él, será mucho menor.

La calidad de un receptor está dado por su **factor de ruido**, ésta es una medida de cuanto ruido puede ser generado por el mismo receptor a la salida y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{FACTOR DE RUIDO} = \frac{\text{Relación señal – ruido en la salida}}{\text{Relación señal – ruido en la entrada}}$$

Los ecos recibidos a una frecuencia de 1247.5Mhz, después de la amplificación, pasa hacia el receptor, en lo que se conoce como **Atenuador de Forma Lineal (Linearizer Attenuator)**. Este dispositivo compensará las enormes diferencias en la fuerza de la señal entre ecos grandes y pequeños.

El primer Oscilador Local es utilizado para re-convertir las señales a 490 MHz, y el segundo oscilador local, para bajarlo a 70MHz, con el cual empieza este proceso, el mismo que es llamado como la **conversión de baja (down-convert)**.

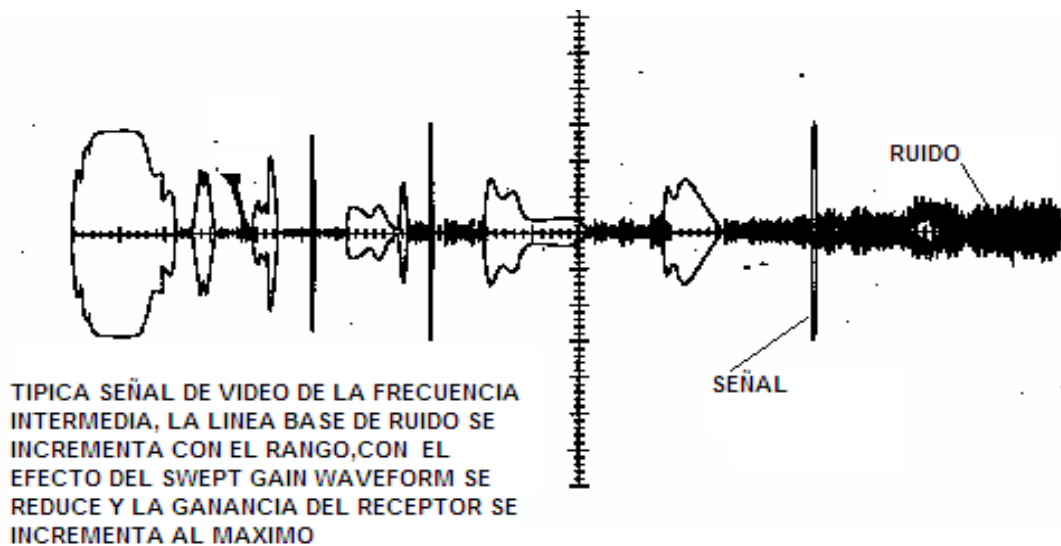


Figura 1.8 Típico trazo de osciloscopio de video i.f. video

## 1.4 PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

### 1.4.1 Clutter (ruido exterior)

El clutter es una expresión que se utiliza para describir blancos en la pantalla de un radar que no son necesarios y que dificultan la observación de blancos realmente importantes. Si el clutter es resultante de edificios cercanos, árboles, altas elevaciones, etc, son referidos como **clutter de suelo (ground-clutter)**. Si los resultados provenientes de olas del mar o tiempo meteorológico adverso, entonces se las denomina como **clutter de mar (sea-clutter)**, o **clutter de clima (weather-clutter)**. Es posible para un procesador de señal radar, tratar en algún grado con la eliminación de algunos de estos efectos adversos, para la presentación en la pantalla del radar.

#### 1.4.2 Efecto Doppler y Detección de Blancos en Movimiento

Como en las ondas de sonido, las ondas electromagnéticas pueden aparecer para cambiar en frecuencia cuando la fuente esta fija o en reposo y luego inicia la aproximación. El movimiento causa que los ciclos por segundo decrezcan o se incrementen cuando se aproxima. ( Ejemplo el ruido de la sirena de una ambulancia en movimiento).

Este cambio en frecuencia (Efecto Doppler) es un monitor útil de la velocidad de la fuente en movimiento. En radares, la fuente puede ser considerada como el blanco radar que produce el eco. En resumen, el eco en movimiento es medido por su “movimiento” con respecto a otros ecos que están fijos. Toma al menos dos PRI's (Pulse Repetition Interperiod) para hacer esto; cada uno es un (SNAPSHOT) disparo en tiempo de toda la **fase detectada** en video durante el período de recepción.

Las diferencias en la frecuencia medida (o fase) entre un PRI y el próximo, son comparados. Las diferencias son filtradas para display. Por lo tanto, es posible tener una presentación radar, que únicamente muestre blancos en movimiento (Indicador de Blancos en Movimiento;( **MTI** ), como se muestra en la figura 1.9.

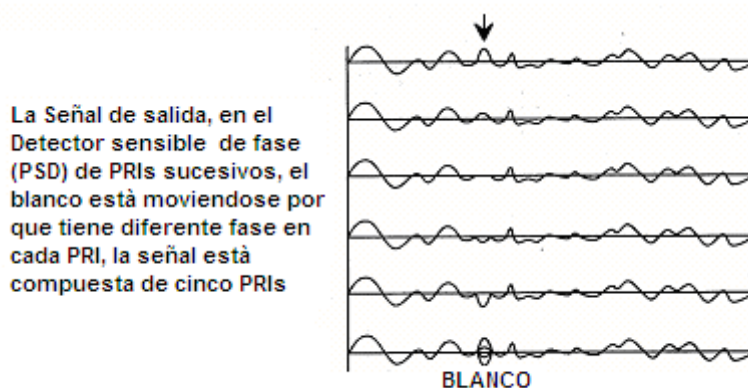


Figura 1.9 Señal de las últimos cinco PRI's vista en un osciloscopio.

En sistemas radáricos modernos, el detector de blancos móviles es usualmente referido como **filtro de clutter de suelo (ground clutter filter GCF)**. Es de utilidad anotar que aunque la presentación radar es “limpia” y no muestra clutter fijo, la detección de todas formas de clutter en movimiento (movimiento desde 4 Nudos de velocidad) será visto como un blanco en movimiento. Esto incluirá el movimiento de las olas del mar, clima, bosques, tráfico terrestre, inclusive aves individuales, así como bandadas de aves. Sin embargo, el MTI ha sido uno de las contribuciones más útiles en la defensa de la vigilancia y la seguridad de vuelo en los años recientes.

### 1.4.3 Coherencia del Sistema

La extracción de información en el Moving Target Indicator (MTI) radica en la **coherencia** del temporizador pulso a pulso entre las transmisiones y la habilidad de analizar y determinar la relación de fase de las señales que ingresan entre PRI's sucesivos. En un sistema impulsado (**DRIVEN**), el sistema de disparo (trigger) del radar hacia el transmisor es derivado de un oscilador básico; el mismo oscilador provee, después de la multiplicación y mezcla, la frecuencia i.f.. La conversión de alta y baja (UP-CONVERTING y DOWN-CONVERTING) hacia y desde las frecuencias de microonda, no hace la diferencia al proceso, en tanto y en cuanto la estabilidad de corto plazo del primer L.O. sea satisfactorio, él cual es denominado **STALO** (oscilador local estable).

### 1.4.4 Detector de fase Sensitivo (PSD)

La frecuencia intermedia (i.f.) recibida, es comparada directamente con el oscilador básico I.F., en el detector sensitivo de fase (PSD). La salida variará en amplitud de acuerdo a la fase de la señal detectada, y un valor de amplitud (**video bipolar positivo o negativo**) será presentado para todos los blancos, fijos o en movimiento.

Cuando las dos señales están en fase, la salida PSD es cero; cuando la diferencia angular es de  $180^\circ$ , la salida PSD es máxima. La información de video de detectada PSD, para todo el rango del MTI, es progresivamente almacenada en un sitio adecuado. En virtud de que el sistema está asegurado en fase (PHASE-LOCKED), la próxima transmisión producirá una respuesta idéntica, proveyendo todos los ecos en el nuevo PRI que son lo mismo. Sin embargo, si ha existido un cambio de fase, que habrá si cualquiera de los blancos se ha movido, el PSD proveerá información de diferente fase para aquellos blancos. Si ahora los dos trenes de video son substraídos, entonces únicamente la información diferente estará presente, por ejemplo los blancos en movimiento. Este proceso es algunas veces conocido como cancelación de blancos fijos.

En sistemas basados en magnetrón, las oscilaciones de microonda no pueden ser garantizadas para comenzar precisamente a la misma fase por cada transmisión con respecto al disparador del sistema coherente. (Por ejemplo el primer medio ciclo de RF

pudiere ser negativo o positivo). Una técnica especial es empleada, la misma que activa el oscilador coherente al comienzo de cada intervalo de repetición de pulso (PRI).

#### 1.4.5 Pérdida o desvanecimiento de Fase (Phase Fading)

Si un blanco es detectado con un desplazamiento de fase de  $360^\circ$  completos, entonces no habrá aparente diferencia en la salida del PSD entre esta información sobre dos PRI's sucesivos y el blanco en movimiento será también cancelado. Esta imperfección es llamada pérdida o desvanecimiento de fase (**phase-fading**). Para superarlo, es normal el generar un segundo i.f. de referencia al PSD, que es desplazado  $90^\circ$ .

Es normal el esperar ver dos canales en un sistema MTI. Uno maneja el video bipolar derivado de la comparación con el i.f. de referencia básico (en fase o canal "I"), los otros llevan a cabo el mismo trabajo, pero utilizando una referencia i.f., que es desplazado  $90^\circ$  (cuadratura o canal "Q"). Una vez que la cancelación ha tenido lugar, las salidas de los canales I y Q son combinados.

Todos los sistemas MTI son presentados con la dificultad de la necesidad de almacenar el flujo serial del video bipolar requerido por el rango MTI. Los primeros sistemas no fueron digitales y utilizaban líneas acústicas de retardo que equiparan a un "RAM dinámico análogo". Para un alineamiento en tiempo preciso de los módulos de amplitud del PRI almacenado y el PRI actual, los dos pudieren ser restados, para proveer la señal MTI.

Algunos sistemas tomaron la señal MTI y realizorn una segunda comparación de otro PRI retardado, para obtener mayor presición de la información, a través de la cancelación. ( **Cancelador dos espira o Two – loop** ).

La tecnología digital ha mejorado los canceladores MTI considerablemente, el video PSD es convertido de análogo a digital y almacenado en un registrador paralelo multi-bit, hasta que esté listo para comparar con el próximo flujo de información.

La resolución puede ser típicamente de  $6K \times 16$  bits para  $80NM$  de rango. El acimut es también digitalizado, comúnmente 4096 subdivisiones por cada revolución de la antena.

Un mayor desarrollo fue el filtro transversal polinomial. El flujo de información PSD para el primer PRI es colocado dentro de un registro acumulador. El siguiente y los subsiguientes PRI's son también aplicados a registros paralelos similares. La información almacenada en cada registro es proporcionado con coeficientes que proveen un valor multiplicador y polaridad. En el PRI final (el cual es requerido para sacar la información), un cálculo matemático es aplicado y el resultado es la señal MTI de clutter de tierra substraído. Los coeficientes son idealmente aplicados como una progresión poligonal, con valores de triángulo de Pascal.

#### 1.4.6 Desvanecimiento Tangencial

Es importante recordar que el MTI reside en el movimiento de los blancos hacia o alejado del radar. Blancos moviéndose tangencialmente al radar no tienen movimiento

relativo y no serán vistos en el MTI. Este problema es referido como Desvanecimiento o pérdida tangencial.

Este fenómeno es usualmente efímero y restringido a quizás uno o dos barridos del radar. Es un fenómeno y no puede ser superado dentro del sistema MTI en si mismo.

El desvanecimiento o pérdida por velocidad ciega se define como la respuesta a la velocidad de la mayoría de los sistemas MTI, se aproxima a una sinusoidal, con salida cero, a velocidad cero y ha sido encontrado con un valor pico (en nudos KTS) de aproximadamente 5% del PRF en Hertz, (para la banda "S"). A 10% del PRF, la respuesta es una vez más cero (**una velocidad cero**) y entonces otro ciclo construye un pico de un 15% de la frecuencia de repetición de pulso (PRF). Por lo tanto, a velocidades correspondientes a cada una décima de PRF, el MTI no arroja salidas.

Si el PRF del radar es 850 PPS, entonces la primera velocidad ciega ocurrirá a los 850Kts (Nudos), la próxima será a los 170Kts, etc. Esto puede ser solucionado mediante el cambio de PRF, de hecho, cada PRI es arreglado u organizado para ser diferente, en un patrón de 6 o más PRI's de duración.

Otro proceso para la detección de blancos en movimiento, es el que pudiere razonablemente ser llamado: "ahora usted lo ve, ahora usted no lo ve". Es el mismo proceso por el cual el ojo humano juzga el movimiento. Si todos los blancos y ruido (clutter) fueren a ser almacenados por un barrido entero de 360°, y entonces abstraído de un nuevo barrido de 360°, el resultado sería únicamente aquellos blancos que no estuvieren en el mismo lugar. Este proceso solía ser conocido como "área MTI". El principio es generar un mapa de toda la presentación radar, que es continuamente actualizada, de tal forma que el mapa resultante provea un promedio alisado o refinado de la densidad y posición de los ecos de clutter fijo. (**Clutter Map**). El mapa es entonces comparado con el barrido actual para cada rango digital y celda acimutal.

## 1.5 INDICADOR DE BLANCOS MÓVILES (MOVING TARGET INDICATOR- MTI)

Es deseable que las señales alimentadas al display (u otras salidas) tengan consistente "background" y esos blancos puedan ser discernidos con confiabilidad de entre el background. La sensibilidad de un sistema es considerado ideal si ocasionalmente un blanco "falso" es presentado. Esto es generalmente aceptable como uno en un millón, por ejemplo con únicamente el receptor operando, un pico de ruido por millón pasa a la salida. Estos son referidos como **alarmas falsas**.

Dentro del receptor i.f., algunas medidas han sido ya encontradas; el uso de un amplificador limitador provee (usualmente) una característica logarítmica que tiene el efecto de amplificación de señales pequeñas hacia una ganancia o amplificación alta, pero señales grandes con una amplificación pequeña. Esta característica es vital para proveer al detector sensitivo de fase con un nivel disponible de blanco con el cual se efectúa la medición y para coincidir el rango de amplitud de ingreso con el rango dinámico del sistema.

El clutter-map puede ser utilizado como una referencia útil para ruido o “jamming”, actividad persistente en áreas de la cobertura del radar serán promediada y se volverá parte del clutter-map. En algunos sistemas, una **muestra de ruido** es tomada cerca del rango final del radar, usualmente por los últimos 16 celdas de rango. En este rango, la presentación radar es improbable que se encuentre algún clutter, pero cualquier ruido o jamming contenido en un sector local también se incrementará dentro del clutter-map.

### 1.5.1 Procesamiento de Salida de video

Una técnica de procesamiento usada comúnmente es el **promediado de background**. Esta característica examina la presencia de blancos sobrepuestos en el clutter y remueve el clutter. Versiones iniciales usaban líneas de retardo analógicas de derivación múltiple (**multi-tapped delay lines**), más recientemente técnicas digitales han proporcionado más control.

El proceso de integración reconstituye y cuantifica las señales de blancos para la salida. Las señales de blancos son analizada celda-rango a celda-rango y modificado en amplitud por una cantidad dependiendo del nivel de señal excede el primer umbral. La cantidad modificada es una cantidad variable, dependiendo si estuviere presente en el PRI previo y una amplitud determinada.

## 1.6 DISPLAYS DEL RADAR

Como la antena del radar gira, es necesario para el sistema de presentación de la información, iniciar el funcionamiento en forma sincronizada de todos los componentes de procesamiento de señales, para ésto se debe conocer la ubicación del lóbulo de radiación con respecto al norte magnético, por lo tanto se alinea la antena con respecto a esta referencia.

Como el rotor gira, una señal AC provista externamente, acopla al bobinado del estator por cantidades que varían dependiendo del ángulo de acople.

El resolutor es un dispositivo similar, pero normalmente tiene cuatro bobinas en lugar de tres. Los síncronos son usualmente cilíndricos, alrededor de 50mm en diámetro y 100mm en longitud.

Empleando Técnicas digitales se realiza un cálculo aproximado; de una señal llamada Automatic Control Pulse (ACP), está señal sirve para sincronizar la rotación de la antena con el inicio de funcionamiento de todos los equipos, la cual es alimentada a un contador la que es transformada en una palabra paralela de 12 bits, produciendo 4096 ACP's por cada revolución de la antena.

El Automatic Reset Pulse (ARP) es arreglado para resetear el contador a cero; esto asegura que la cuenta comience en cero después de la primera revolución. Si la palabra de 12 bits del acimut es sumada digitalmente a un valor de descentrado o

desplazamiento (offset) (normalmente generado por enlaces o switches), la cuenta de acimut puede ser modificada y la información de rotación puede ser organizada para alinear apropiadamente sin la necesidad de ajustar ningún dispositivo en la antena.

Adicionalmente, en el evento de necesitar reemplazar el codificador, podría ser asegurado a cualquier ángulo como sea conveniente la corrección de la alineación al norte llevada a cabo mediante el cambio del offset (descentrado) digital.

Como técnica de conversión de información mejorada, se hace posible reemplazar el demodulador con un simple circuito integrado que es capaz de generar ACP's y ARP directamente desde el sincronizador o resolutor de información. Esto también significa que no es necesario por más tiempo, setear el sincronizador exactamente; los mismos dispositivos de descentrado u offset digital están disponibles como es el caso del dispositivo codificador.

La salida del contador ACP es utilizado para generar sintéticamente, una serie de formas de onda adecuadas para la generación de un trazo de rotación en la pantalla del radar.

En algunos sistemas radáricos, el procesador del display es central y sirve a un número de displays semiautónomos con información de seguimiento, provisto por ambos tipos de radar, es decir el primario y el secundario.

También en el procesador, están los mapas de video y el software operacional; por ejemplo un sistema de defensa también contendrá los programas relativos a aviones interceptores controlados por radar. Esto no únicamente asegura que los operadores faciliten las tareas de los pilotos, sino también que pueda guiar al piloto del avión interceptor, en misiones de vuelo, en un perfil de interceptación específico proporcionado por el software.

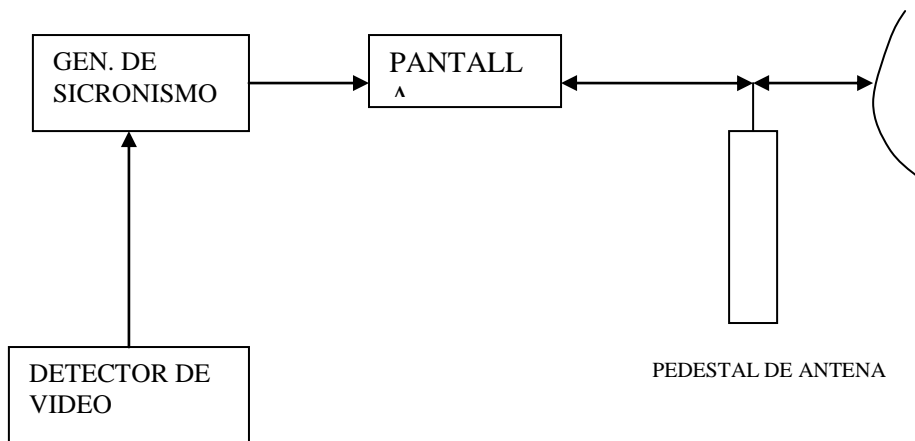


Figura 1.10 Diagrama básico del proceso de trabajo de una pantalla de radar

## 1.7 RADAR SECUNDARIO

Un sistema radárico para ser completo es necesario contar con un sistema de identificación de las aeronaves, por tal razón la aeronave es seguida los 360° para mantener su nominativo, rumbo, altitud y velocidad, el cual ha sido denominado radar de vigilancia por sus siglas en inglés SSR e IFF.

Hasta aquí se ha tratado con un radar, cuya operación se basa en blancos con capacidad de reflejar un pulso transmitido y todas las dificultades que ello conlleva. Un problema definido con los primeros radares, fue el hecho de que era imposible originalmente determinar la identificación entre un escuadrón de bombarderos enemigos, o uno amigo.

Un sistema fue desarrollado durante los años 40, y se lo conoció como **Interrogación Amigo o Enemigo (por sus siglas en inglés IFF)**. El principio de operación se basaba en que una señal adicional (secundaria) era enviada al mismo tiempo que la transmisión del radar principal, pero a una potencia mucho más baja, a una diferente frecuencia y desde una diferente antena, hacia aquella del transmisor principal. En lugar de reflejar la potencia, un receptor especial en la aeronave respondería a la señal secundaria y automáticamente transmitiría de regreso a la estación radar, un pulso en otra frecuencia. El equipo de la aeronave es conocido como **transponder**.

La estación radar entonces recibiría la señal secundaria de la aeronave y la presentaría en un display especial. La estación radar conocería por lo tanto, si la aeronave es amiga, este arreglo fue desarrollado dentro del sistema, el cual es usado estos días en su mayoría por aerolíneas civiles.



El transmisor/receptor secundario en la tierra es conocido como **interrogador**. Este envía sus transmisiones y recibe sus respuestas por medio de una antena separada, usualmente montada en la parte superior de la antena del radar primario. Este envía un set de pulsos codificados a la aeronave, la cual los “contesta” de acuerdo con otras series de pulsos codificados, pero con mas información (hasta 16 bits), que denota ya sea un código militar específico asociado con una misión o un código de respuesta civil que es usualmente asociado con un número de vuelo. En lugar del IFF militar, el sistema civil ahora es conocido como **Radar de Vigilancia Secundario (por sus siglas en inglés SSR)**.

Después del procesamiento del SSR, una etiqueta es adicionada al blanco radar en la pantalla, el cual en su forma básica podría leer por ejemplo “BA062, 350”, que en este caso significa “Aerolíneas Británicas, vuelo 062, 35,000 ft.. Puesto que los números de vuelo son exclusivos para rutas de una vía, tiempos y horarios, el vuelo puede ser con claridad identificado por los controladores de tráfico aéreo y seguidos en ruta.

Es imperativo que todas las aeronaves y estaciones en tierra, si ellos son interrogados y responden, tengan la misma especificación. Normalmente algunas de las características son las siguientes:

**Tabla 1.1 Parámetros de transmisión del radar secundario**

PARAMETRO	INTERROGADOR	AERONAVE
Frecuencia de Tx.	1030Mhz.	1090Mhz
Potencia de Tx.	2Kw pico	500w pico
Frecuencia de Rx.	1090Mhz	1030Mhz
Rx MDS (Mínima señal detectable)	-87dBm	-87dBm
PRF (pulsos por Segundo)	<410Hz	<2Khz
Ancho de Pulso	3x0.8µS	Hasta 16x0.45 µS

Note como en SSR, únicamente una potencia pico pequeña es suficiente para ejecutar su trabajo hasta al menos 240nm. Esto es porque, la ley o aplicación conceptual de la raíz cuarta en función de la distancia no se aplica. No existe un eco, pero si una transmisión fresca en 500W de potencia pico desde el transponder de la aeronave, únicamente en una vía después de cada interrogación. (La distribución de hecho sigue una ley de cuadrado inverso).

Las señales de SSR normalmente consisten de un grupo de tres pulsos de 0.8 µS, espaciados estratégicamente. El interrogador tiene una selección para radiar cualquiera de los tres modos en un patrón entrelazado. Los modos 1 y 2 son reservados para uso militar, donde el modo 3 es compartido por civiles y militares. Los modos de uso civil son conocidos como modo A, modo B, modo C y modo D. Puesto que el modo 3 es compartido se lo refiere como modo 3/A. Actualmente no se han utilizado mucho los modos B y D.

Cuando el transponder de las aeronaves acusa recibo la recepción de una transmisión SSR, la replica es con un tren de hasta 16 pulsos presentados en la figura 1.12 Los pulsos forman una información codificada, que provee detalles que posibilitan la identificación individual de las aeronaves. Esto puede ser convertido en un nominativo o señal de llamada para uso civil.

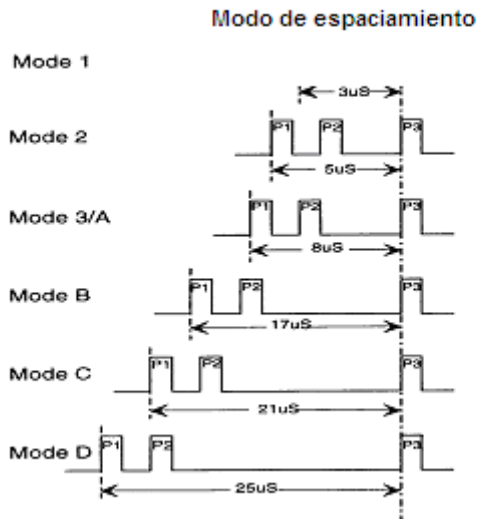


Figura 1.11 Pulsos de transmisión del SSR

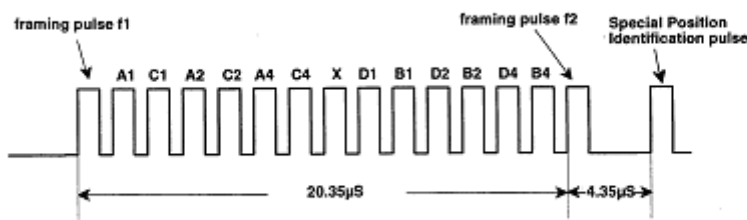


Figura 1.12 Tren de pulso de respuesta del SSR 45 us de duración

El modo C es siempre usado para la información de altura. En este modo, el transponder lee el altímetro del avión y el código de 12 bits responde al modo C del interrogador, que leerá la altura, con una resolución de 100ft, en código gris. El equipo de recepción convierte el código directamente en altura del avión, que es presentado en la pantalla del radar paralelamente con los otros modos o nominativos. Si la aeronave está haciendo una aproximación a tierra, la lectura de altura tiene una provisión para corrección de la presión atmosférica. (corrección QNH).

## 1.8 EXTRACCIÓN DE PLOTS

Tradicionalmente, los operadores de radar han puesto toda su fe en un plot, que representa el blanco detectado por un radar en la pantalla (PPI), y en un momento marcaría en esa pantalla, el progreso de ese vuelo utilizando un lápiz crayón.

Afortunadamente, la tecnología ha mejorado con los años, la posibilidad de seguimiento automático de blancos aéreos y marítimos. En los primeros días, únicamente la señal secundaria facilitaba en si misma para determinar la posición del blanco en la pantalla automáticamente y esto trabajaría por supuesto, si la aeronave dentro del rango del radar estuviere equipado con el necesario **transponder**. No sería normal el encontrar más de 40 o 50 blancos SSR en cualquier pantalla de radar.

El PSX200 tuvo la capacidad de abrir camino al centro exacto de una respuesta SSR y acoplar con la información de rango, pudiendo presentar el blanco, no como un plot, sino como un símbolo sintético representando la posición del blanco. El símbolo no sería parte del video serial, pero en un mapa de formato diferente, sus posiciones "X" e "Y" estarían en cada barrido del radar, manteniéndose estático en la pantalla del display.

Más tarde, otros procesadores fueron adicionados al display del radar Watchman, que permitió una facilidad de seguimiento o traqueo de todos los blancos, además de los plots normales y de video display.

La idea de intentar la extracción de plots para radares primarios fue entonces considerado algo bizarro. Con tales factores, tales como clutter o ruido, significaría que muchos miles de blancos, falsos o que requerían procesamiento entrarían en este proceso. Sin embargo, esto fue intentado primeramente por Plessey a inicios de los años 80 en el radar AR-3D; una estructura de equipo de aproximadamente 25 PCB's dedicados como primeros extractores de plots. El sistema de display al cual el extractor de plots reporta, fue una vez más la computadora PDP11/34.

El extractor de plot primario, debe ser capaz de procesar el video recibido desde el receptor del radar y analizarlo para determinar el centroide exacto del eco del radar. Para hacer esto, debe analizar toda la información de video asociada con el eco y descartar toda la información no necesaria, para dejar en el centro, un plot video colapsado simple, definido por un acimut y un rango. Algunas veces otra información es requerida, por ejemplo fuerza del blanco en amplitud o duración de la carrera y donde fuere apropiado, el canal en el que se origina el video.

Si hay más que un tipo de video (por ejemplo video MTI, video área MTI, video MCF, etc.), entonces cada grupo pudiere ser analizado separadamente y entonces examinado por asociación, para determinar el centro exacto del blanco compuesto. Desde este punto en adelante, una vez resuelto el blanco y colocado en un juego de palabras digitales que representan el rango, acimut, etc., la información de blancos tiene forma digital y es cargado o almacenado en forma digital en memoria o registradores. Lo cual será reformateado y transferido al sistema de display para ser presentado como un símbolo de blanco a la distancia y acimut apropiada. Mientras ya no es un blanco en tiempo real, la información debe ser utilizada por el display antes de la siguiente revolución de la antena, o será invalidada.

El extractor de plots secundario usualmente espera lidiar con:

- El análisis de toda la información video SSR, para determinar la posición del blanco.

- Decodificar la altura de la aeronave y los códigos de identificación.
- Decodificación de respuestas de emergencia.
- Proveer, en un formato adecuado, toda la información de arriba para ser presentada.

El extractor de plots secundario tiene ligeramente un trabajo más fácil que realizar que el extractor de plots primario, principalmente, porque todas las respuestas vienen de aeronaves o buques los cuales llevan transponders. No hay clutter de tierra y por lo tanto los requerimientos del Control False Alarm Radar (CFAR) son menos exigentes. El ancho de banda es usualmente definido, y el rango del blanco es temporizado independientemente del radar primario. Es usual para un radar secundario ser definitivo en la posición del blanco si ambos tipo de video, primario y secundario del mismo blanco están presentes.

En sistemas monopulso SSR, es normal esperar 16384 bits de resolución en azimut. El ancho de banda es muy estrecho y el tiempo de barrido a través del blanco es usualmente de 1 o 2 PRI's. Esto posibilita al extractor de plots secundario producir un número grande de plots, puesto que efectivamente, respuestas monopulso toman alrededor de una décima del espacio de aquellas señales SSR convencionales.

## **1.9 CLASIFICACIÓN DE LOS RADARES**

Los radares pueden ser clasificados como sistemas radáricos en la tierra, a bordo de aeronaves o barcos, también se puede clasificar por categorías de acuerdo las características propias de cada radar meteorológico, como por ejemplo de acuerdo a la banda de frecuencia, tipo de antena y formas de onda utilizadas.

Otra clasificación puede ser considerada en la misión o la función, como puede ser para radar meteorológico, de Adquisición y búsqueda, enganche, control de fuego, alerta temprana, control del horizonte según el equipamiento del terreno y Radares contra Radares de tierra.

Radares de arreglo en fase (Phased Array) utilizan antenas de arreglos en Fase y son a menudo llamados Radares multifuncionales. Los radares Phased Array están compuestos por una antena formada por dos o más radiadores básicos, estas antenas tipo Array o arreglos producen lóbulos angostos direccionales que podrían ser variados electrónicamente o mecánicamente.

Electrónicamente pueden ser variados al controlar a los elementos de la antena y la fase de la corriente eléctrica con la que son alimentados, razones por la cual adoptan el nombre de Phased Array, por esta razón se clasifican en dos tipos de radares, por su forma de onda y por la frecuencia de operación.

Primeramente considerando las formas de onda, los Radares pueden ser de onda continua (CW) o Radares pulsados (PR) los cuales emiten energía electromagnética continuamente y usan antenas separadas para la transmisión y recepción. Los radares

(CW) sin modulación, pueden medir la velocidad radial y posición angular de un blanco.

La información del rango del blanco no puede ser extraída sin la utilización de la información de la modulación.

El “radar primario” llamado así porque es la señal real del lóbulo radiación utilizado por Radares de onda continua (CW) sin modulación, los cuales sirven para obtener la velocidad de un objeto, así como el enganche y la búsqueda de la guía de misiles.

Los Radares pulsados (PR) utilizan una forma de onda de un tren de pulsos principalmente con modulación, en esta categoría los sistemas Radáricos pueden ser clasificados por el tipo de PRF sea LOW PRF, MEDIUN PRF Y HIGH PRF, parámetro que depende mucho de la frecuencia de operación del transmisor como se puede observar en la tabla 1.2.

El LOW PRF es utilizado para medir el alcance y donde es más importante medir la velocidad del blanco. El MIGM PRF es utilizado principalmente para medir la velocidad del blanco. La frecuencia CW es Utilizada en radares pulsados se lo emplea para medios ambos parámetros como es: Medir la velocidad y la distancia del blanco.

**TABLA 1.2 Bandas de Frecuencia de Radares.**

BANDA	LONGITUD DE ONDA	FRECUENCIA	APLICACIÓN
HF (high frequency) Decametric	100 - 10 m	3-30 MHz	Radio, broadcast
VHF (very high frequency) Metric	10 - 1 m	30-300 MHz	Radio, TV
UHF (ultra high frequency) Decimeter	1m - 30 cm	300-1000 MHz	RADAR, TV
L, microwave region	30 - 15 cm	1000-2000 MHz	RADAR, TV
S, microwave	15 - 7.5 cm	2000-4000 MHz	RADAR
C, microwave	7.5 - 3.8 cm	4000-8000 MHz	RADAR
Ku, microwave	2.5 - 1.7 cm	12-18 GHz	RADAR
X, microwave	3.8 - 2.5 cm	8000-12000 MHz	RADAR
K, microwave	1.7 - 1.1 cm	18-27 GHz	RADAR

Ka, extremely high frequency	11 - 7.5 mm	27-40 GHz	RADAR
mm, extremely high frequency	7.5 - 1 mm	40-300 GHz	

Los Radares con frecuencias altas (HIGH), utilizan la reflexión de las ondas electromagnéticas en la ionosfera para detectar blancos por debajo del Horizonte.

También existen radares que funcionan en la banda L que son instalados en tierra y en barcos, utilizados en gran medida por el ámbito militar y control de tráfico aéreo en operaciones de búsqueda.

Los radares de Banda S, son utilizados en estaciones de tierra y barcos de rango medio, como en los aeropuertos en control de tráfico aéreo, en aeronaves de alerta y control como el AWACS, en Radares meteorológicos.

Los Radares de Banda C, son utilizados en rango medio en radares de control de tiro militar y en radares de instrumentación métrica.

La Banda es X utilizada en radares donde el tamaño físico de la antena es un limitante, como en equipos de abordo y aviones militares que tienen multimodo. Los sistemas Radáricos que requieren capacidades de detección de blancos más exacta o fina y que no toleran la alteración atmosférica también utilizan la banda X.

Las Bandas KU, K y KA por sufrir alta alteración atmosférica, la utilización de estas Bandas de frecuencia limitada utilizados en radares de control de tráfico para la policía.

### **1.9.1 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE RADAR**

Las principales aplicaciones de los sistemas de radares son las siguientes:

- a. Geología
- b. Agricultura
- c. Cartografía
- d. Hidrología
- e. Oceanografía
- f. Radares Meteorológicos Doppler

Los radares meteorológicos son los únicos equipos capaces de seguir y predecir el comportamiento de eventos meteorológicos significativos como fuertes tormentas, tornados, granizadas, lluvias, etc.

Estos eventos se caracterizan por afectar áreas pequeñas pero con importantes daños y se desarrollan y evolucionan muy rápidamente por lo que debe contarse, para alertar sobre los mismos, con instrumentos de medición en tiempo real dentro de áreas relativamente pequeñas.

En los últimos 10 años el costo de un radar doppler se ha reducido en más de 5 veces por lo que en la actualidad, es posible, incluso para empresas privadas, la instalación y operación de un radar doppler para prevenir inconvenientes de origen meteorológico en sus actividades. Empresas de pesca, petroleras, centros de deportes invernales, entre otras, pueden reducir drásticamente los inconvenientes en sus actividades con la utilización de un radar doppler, evitando pérdidas, daños al medio ambiente y riesgos a la vida humana.

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS DE LOS PRÁMETROS DEL RADAR

#### 2.1 PÉRDIDAS DEL RADAR

Esta sección describe las pérdidas que pueden afectar al radar sean estas externas e internas de acuerdo al siguiente detalle:

##### 2.1.1 PÉRDIDAS EN LA DETECCIÓN DEL RADAR

Como se indica en el análisis de la ecuación del radar, la relación SNR, Signal Noise Ratio, es inversamente proporcional a las pérdidas del radar, entonces cuando se aumenta las pérdidas del radar, puede ocasionar una caída en la relación SNR, por lo tanto disminuiría la probabilidad de detección. Por eso, la diferencia entre un buen diseño de un radar y el pobre diseño, son las pérdidas que pueden existir por resistencia (ohms) y estáticas internas de los equipos.

##### 2.1.2 PÉRDIDAS EN EL TRANSMISOR Y RECEPTOR

Las pérdidas ocurren o se producen en el puerto de entrada entre el transmisor y la antena así como entre el puerto de salida de la antena y el receptor. Estas pérdidas son llamadas de acoplamiento, y están en el orden de 1 a 2 dB.

##### 2.1.3 PÉRDIDAS EN EL LÓBULO Y EN EL BARRIDO DE LA ANTENA

En la ecuación del radar se asume que la ganancia de antena es máxima, esto puede ser verdad si el blanco está ubicado en el Lóbulo de la antena, sin embargo, cuando el radar ilumina con el HAZ de radiación directamente a un blanco, la ganancia de la antena será menos que el máximo, la cual es definida como lóbulo de radiación. La pérdida por ruido SNR, no permite tener máxima

ganancia de la antena la que es llamada lóbulo o patrón de radiación, que esta dada por la forma del mismo. Entonces una antena debe ser seleccionada para obtener la menor pérdida posible del patrón de radiación, la cual puede ser calculada matemáticamente.

Por ejemplo; considerando que el Seno  $x/x$  es el patrón de radiación que tiene una región angular de  $\pm \theta/2$  se puede calcular la ganancia promedio de la antena, por medio de

la siguiente expresión.

$$G_{av} = 1 - \left[ \frac{nr}{\lambda} \right]^2 \frac{\theta}{72}$$

Ec. 2.1



G = ganancia de una antena del radar  
r = Radio  
 $\lambda$  = Longitud de onda

#### 2.1.4 PÉRDIDAS ATMOSFÉRICAS

Las ondas electromagnéticas viajan a través del libre espacio sin sufrir pérdidas de energía, pero con la presencia del vapor de agua y gases de la atmósfera, la energía del radar puede sufrir pérdidas estas son conocidas como atenuación atmosférica, la misma que aumenta significativamente en presencia de la lluvia, neblina, arena y nubes. Muchas de las pérdidas de la energía del radar son normalmente absorbidas por los gases y vapor de agua, transformándolas en calor mientras una pequeña porción de esta pérdida de energía es usada en transformación molecular de partículas atmosféricas. La ecuación 2.2 permite calcular la atenuación en las dos vías del viaje de la onda a lo largo del rango del radar.

$$L = e^{2\infty R} \quad \text{Ec. 2.2}$$

L = atenuación  
R = radio  
 $\infty$  = Coeficiente de la atenuación en una vía.  
Algunos valores de atenuación atmosféricas:

Vapor de agua = 22.3 Ghz  
Picos de Oxígeno = 60 a 118 Ghz.  
Severa atenuación = > 35 Ghz.

Razón por la cual los radares de tierra muy rara vez tiene frecuencias mayores 3 GHz, para facilitar el cálculo de la atenuación atmosférica en función del coeficiente de atenuación, se utiliza el programa MATLAB para graficar las curvas características de la atenuación, versus el rango para 3 GHz, frecuencia que normalmente utilizan los radares.

#### 2.1.5 COLAPSO DE PÉRDIDA (COLLAPSING LOSS)

Cuando los pulsos de retorno integrados con ruido es mayor que los pulsos de retorno de los blancos, se producirá una caída de la SNR, a estos se les llama collapsing loss, el factor de collapsing loss está definido por:

$$\rho_c = \frac{n + m}{N} \quad \text{Ec. 2.3}$$

n = número de pulsos que contienen señal de ruido  
m = Pulsos que contienen solo ruido

### **2.1.6 PÉRDIDAS EN EL PROCESAMIENTO DE SEÑALES**

La detección de aproximación es igual a la pérdida de la potencia de la señal de 0,5 a 1 dBs.

El Constant False Alarm Rate (CFAR) loss, permite mantener el control de las alarmas falsas cambiando la interferencia desconocida CFAR, las que puede causar la pérdida de SNR en el orden de 1dB.

Existen tres tipos CFAR circuitos utilizados para eliminar las falsas alarmas

- Adaptive CFAR.
- Nonparametric CFAR
- Nonlinear CFAR.

La pérdida de cuantificación produce un incremento del ruido a la salida del A/D.

### **2.1.7 OTRAS PÉRDIDAS**

Se puede incluir como otras pérdidas las producidas por el equipo o el Hardware, tales como pérdidas de acoples de filtros y pérdidas por la eficiencia de la antena.

### **2.1.8 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA DEL RADAR**

Se asume que las ondas viajan en el espacio libre sin la interferencia de la tierra y de la atmósfera, llamado free space, la cual podría ser adecuada para el mejor entendimiento del sistema radárico.

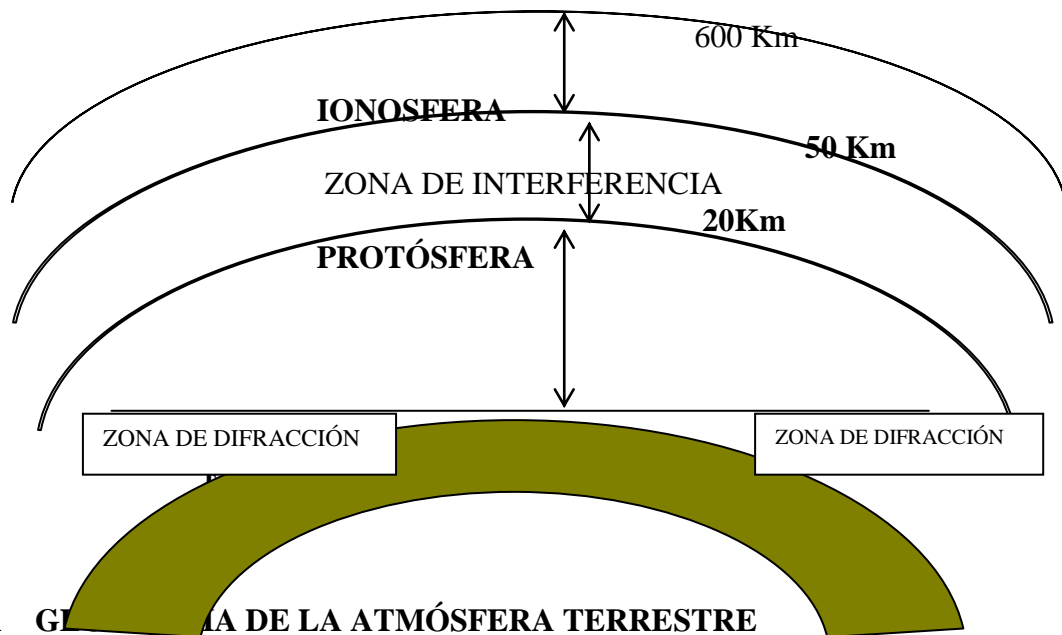
Con el fin de mejorar o ser más exactos en los cálculos de los parámetros de rendimiento del radar, el análisis debe ser modificado incluyendo los efectos de la tierra y de la atmósfera.

Estas modificaciones deben ser consideradas en los cálculos por las reflexiones del suelo producidas por la superficie de la tierra, por el reflejo de las ondas electromagnéticas en la refracción o atenuación de las ondas, por la atmósfera terrestre y por la alteración o absorción de la energía del radar por los gases que forman o constituyen la atmósfera.

## **2.2 ATMÓSFERA TERRESTRE**

La atmósfera terrestre esta formada por varias capas como se ilustra en la fig. 2.1 La primera capa se extiende en unos 20 Km. conocida como protósfera, las ondas electromagnéticas se refractan cuando viajan a través de la protósfera (Bend Downward).

El efecto de la refracción de la protósfera está relacionada a la constante dieléctrica la cual está en función de la presión, temperatura, vapor de agua y gases. Adicionalmente en la atmósfera también la energía del radar sufre pérdidas, estas son conocidas como atenuación atmosférica, y se incrementa significativamente ante la presencia de lluvia, neblina, polvo y nubes. La región entre los 20 Km. a 50 Km. es conocida también como zona de interferencias.



### 2.2.1 GEOMETRÍA DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE

La ionosfera se extiende desde los 50 Km. hasta los 600 Km, para bases de baja densidad comparadas con la protósfera. Ésta contiene una significativa cantidad de electrones libres.

La ionización es puramente causada por los rayos ultravioletas y rayos X del sol. La presencia de electrones, libres en ionosfera afecta a la propagación de las ondas electromagnéticas en diferentes caminos. Estos afectos incluyen refracciones, absorción, emisión de ruido y rotación de polarización.

La ionosfera se extiende desde los 50 Km hasta los 600 Km, son de baja densidad comparadas con la protósfera, ésta contiene una significativa cantidad de electrones libres.

La ionización es puramente causada por los rayos ultravioletas y rayos x del sol. La presencia de electrones libres en la ionosfera afecta a la propagación de las ondas electromagnéticas en diferentes caminos, estos afectos incluyen refracción absorción, emisión de ruido y rotación de polarización.

El grado de degradación depende permanentemente de la frecuencia de las ondas de incidencia. Por ejemplo la frecuencias por debajo de los 4 a 6 Mhz, son completamente reflejadas en las capas mas bajas de la ionosfera y las frecuencias más

de 30 Mhz podrían penetrar la ionosfera con algún grado de atenuación, en general si la frecuencia aumenta el efecto es menor.

La región por debajo del horizonte de la superficie de la tierra es llamado región de la difracción, el término difracción describe el choque y reflejo de las ondas del radar alrededor de objetos físicos, existe dos tipos de difracción, el (Knife edge and cylindre edge diffraction).

### 2.2.2 REFRACCIÓN

Las ondas electromagnéticas, cuando existe espacio libre viajan en línea directa (línea de vista), pero en presencia de los obstáculos terrestre ellas se refractan.

La refracción es un término usado para describir la desviación de las ondas de propagación del radar de las líneas directas o rectas, esta derivación es causada por la variación del índice de refracción el cual es definido por:

$$n = c/v \quad \text{Ec. 2.4}$$

c= velocidad de la luz  
v= velocidad de la onda.

Cuando el índice está cerca de la superficie de la tierra representa la unidad. Cuando se aumenta la altitud, el índice disminuye gradualmente.

La refracción afecta a las ondas del radar en dos diferentes formas. Dependiendo de la altura de las aeronaves, para blancos que tienen altitudes típicamente cerca de los 100 metros, el efecto de refracción se ilustra en la Fig. 2.2, en este caso, la refracción impone limitaciones a la capacidad del radar, al realizar la medición de la posición del blanco, introduce un error en el ángulo de elevación.

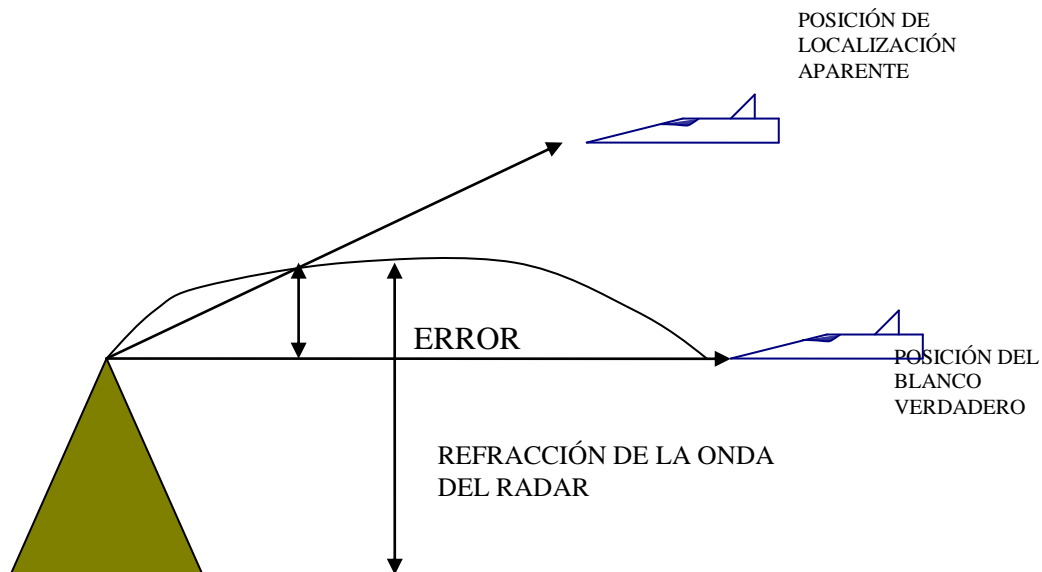


Figura 2.2 Efecto de refracción en la detección de la aeronave

### 2.2.3 REFRACTIVIDAD

En el otro caso cuando la gradiente de la refractividad está cercana a la superficie de la tierra, la cual es casi siempre constante, los cambios de temperatura y humedad que están cerca de la tierra, pueden producir cambios en el perfil de la refractividad. Cuando el índice de la refractividad es demasiado grande las ondas electromagnéticas siguen la curvatura de la tierra, consecuentemente el rango del radar se extiende en el horizonte, este fenómeno

es llamado “ducting”, el cual puede ser un problema serio sobre la superficie del mar, particularmente durante la época del verano o época caliente.

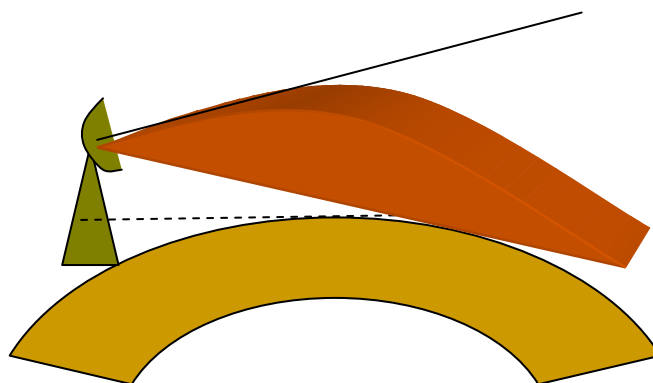


Figura 2.3 Grafica de la refractividad llamado “DUCTING”

### 2.2.4 REFLEXIÓN DEL TERRENO

Cuando las ondas del radar son reflejadas por la superficie de la tierra, sufre la pérdida de amplitud y cambio de fase, para este efecto intervienen tres factores que son el coeficiente para la superficie plana, el factor de la curvatura de la tierra y la rugosidad de la superficie terrestre.

### 2.2.5 DIVERGENCIA

El coeficiente de la reflexión es también afectado por el factor D de divergencia alrededor de la tierra. Cuando las ondas electromagnéticas son proyectadas a la tierra, se producen ondas reflejadas llamadas divergentes que son producidas por la curvatura de la tierra; la energía reflejada es proyectada y la densidad de potencia es reducida, la ecuación 2.5 expresa la relación de divergencia.

$$D = \frac{1}{\sqrt{\frac{1 + Zr1.r2}{rersen \varphi g}}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

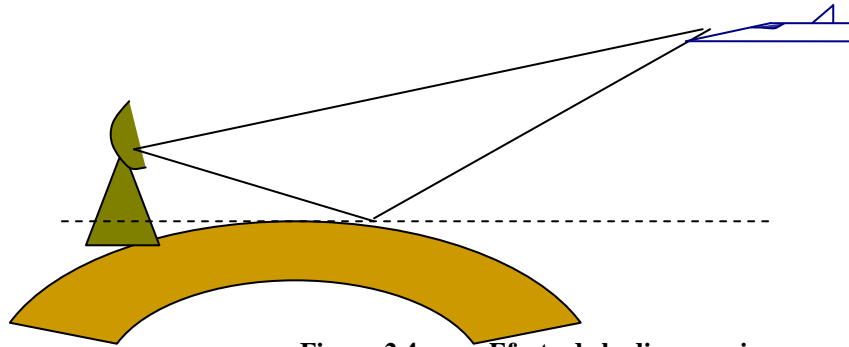


Figura 2.4 Efecto de la divergencia

### 2.2.6 RUGOSIDAD DEL TERRENO

Además de la divergencia, la rugosidad de la superficie terrestre afecta también al coeficiente de reflexión, el cual está dado por

$$Sr = e^{-2 \left[ \frac{2\pi h \text{sen}}{\varphi n} \right]} \quad \text{Ec. 2.6}$$

h= es la altura de la superficie irregular

En general los rayos reflejados sufren cambios en amplitud y fase, la cual produce una porción difusa de la señal reflejada, la combinación de estos tres factores dan como resultado el coeficiente:

$$\tau_t = \tau \Gamma^* \nu \Gamma Sr \quad \text{Ec. 2.7}$$

$\Gamma(\mathbf{h}, \mathbf{v})$  = coeficiente de refracción de la superficie plana horizontal y vertical.

### 2.3 ECUACIÓN DEL RADAR

Considerando que un radar tiene una antena omni direccional, la cual emite radiación igual en todas las direcciones, y debido a que existen de antenas las cuales

forman un patrón de radiación esférico, se puede apuntar o dirigir a cualquier punto del espacio representado por la siguiente expresión:

$$pd = \frac{\text{potencia del tx}}{\text{área de la esfera}} = \left[ \frac{\text{watts}}{m^2} \right] \quad \text{Ec. 2.8}$$

O también representado por :

$$Pd = \frac{PI}{4\pi R^2} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Pt= Potencia del Transmisor

R= Radio de la esfera

Para aumentar la densidad de potencia en una determinada dirección, se debe considerar la ganancia de la antena y la apertura efectiva de la misma representada como Ae.

$$Ae = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde

$\lambda$  = Longitud de onda

La densidad de la potencia del radar en función de la ganancia G a un determinado, rango R se tiene:

$$Pd = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Cuando el haz de radiación del radar ilumina a un blanco, lo hace en todas las direcciones. La cantidad de energía radiada es proporcional al tamaño del blanco, orientación la forma física y el material, todos estos parámetros dan como resultado el “ Radar Cross Section “ (RCS).

### 2.3.1 SECCIÓN DEL CRUCE DEL RADAR

El RCS es definido como la relación entre la potencia reflejada de regreso al radar y la potencia incidente del blanco, representado por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{Pr}{Pd} = \left[ \frac{4\pi R^2}{\lambda^2} \right]^{-1} \quad \text{Ec 2.12}$$

Pr= Potencia reflejada desde el blanco

Donde Pr es la potencia reflejada del blanco y el total de la potencia entregada al procesador de señales por la antena es la siguiente:

$$P_{Dr} = \frac{P_t G \sigma}{\left[ \frac{4\pi R^2}{\lambda^2} \right]} A_e \quad \text{Ec 2.13}$$

Pt = Potencia del transmisor

G = Ganancia

Ae = Apertura de la antena

$\sigma$  = RCS

R = Rango del blanco

Sustituyendo Ae de la Ec 2.10 en la Ec 2.13 se tiene la siguiente expresión:

$$P_{Dr} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{\left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 R^4} \quad \text{Ec 2.14}$$

Si se pone en función de la mínima señal de potencia detectable, se obtiene el máximo rango del radar

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{\left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 S_{\min}} \right]^{1/4} \quad \text{Ec 2.15}$$

Si se desea duplicar el rango máximo del radar, se debería aumentar la potencia de la transmisión Pt en seis veces o su equivalente y cuatro veces la apertura efectiva de la antena Ae.



En situaciones prácticas o reales, las señales que regresan al radar vienen con ruido SNR, las cuales ingresan voltajes no requeridos en todas las frecuencias del radar. Estas señales no requeridas también afectan en las expresiones matemáticas al calcular el rango máximo o alcance del radar y se la representa de la siguiente forma:

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 k T_e B F \text{SNR}_{\min}} \right]^{1/4} \quad \text{Ec 2.16}$$

- SNR = Relación señal ruido (dB)
- K = Constante de Boltzman's =  $1,38 \times 10^{-23}$  Joule / K °
- T = Temperatura efectiva (K°)
- F = figura de ruido (fidelidad del receptor) (dB).
- B = Ancho de Banda.

En la expresión matemática con la cual se calcula el alcance máximo del radar (Rmax), intervienen prácticamente todos los parámetros teóricos y físicos, esta misma expresión puede ser calculada mediante la utilización del programa MATLAB y graficadas las vías producto de la relación rango max y SNR (señal ruido).

La implementación del programa en MATLAB para calcular el rango del radar con la expresión matemática de la ecuación del radar se lo realiza de la siguiente forma :

$$(\text{SNR})_o = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 k T_e B F L R^4} \quad \text{Ec. 2.17}$$

**Tabla 2.1 Parámetros del programa para calcular la ecuación del radar**

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ESTADO
pt	Potencia pico	Kw	Entrada
freq	frecuencia	hz	Entrada
G	Ganancia antena	dB	Entrada
Sigma	Sección del blanco	M2	Entrada
Te	Temp. Efectiva	Kelvin	Entrada
B	Ancho de banda	Hz	Entrada
Nf	Figura de ruido	dB	Entrada
Loss	Pérdida radar	dB	Entrada
Input_par	SNR, o Rmax	dB o Km	Entrada
Opción	1means entrada_par=SNR 2means entrada_par	ninguno	Entrada

	=R		
Rcs_delta1	rscs delta1(sigma-delta1)	dB	Entrada
Rcs_delta2	rscsdelta2(sigma+delta2)	dB	Entrada
Pt_percent1	Pt*pt_porcentaje1%	ninguna	Entrada
Pt_percent2	Pt*pt_porcentaje2%	ninguna	Entrada
Out_par	R opción=1 SNR opción=2	Km, o dB	Salida

## PROGRAMA PARA CALCULAR LA ECUACIÓN DEL RADAR

```

function [snr] = radar_eq(pt, freq, g, sigma, te, b, nf, loss, range)
% Este programa implementa la Ec. (2.17)
c = 3.0e+8; % Velocidad de la luz
pt = 1.5e+6; % potencia pico en Watts
freq = 5.6e+9; % Frecuencia de operación del radar en Hz
g = 45.0; % Ganancia de antena en dB
sigma = 0.1; % radar cross section en m2
te = 290.0; % Ruido efectivo de la temperatura en grados Kelvins
b = 5.0e+6; % Ancho de banda de operación en Hz
nf = 3.0; %Figura de ruido en dB
loss = 6.0; % Pérdidas del radar en dB
range = linspace(25e3,165e3); % Rango del blanco desde 25 Km 165 Km, 1000 puntos
lambda = c / freq; % longitud de onda
p_peak = 10*log10(pt); % potencia pico convertida a dB
lambda_sqdb = 10*log10(lambda^2); % Cálculo del cuadrado de la longitud de onda
en dB
sigmadb = 10*log10(sigma); % convierte en sigma a dB
four_pi_cub = 10*log10((4.0 * pi)^3); % (4pi)^3 in dB
k_db = 10*log10(1.38e-23); % Constante de Boltzman's en dB
te_db = 10*log10(te); % ruido térmico en dB
b_db = 10*log10(b); %Ancho de banda en dB
range_pwr4_db = 10*log10(range.^4); % Rango del vector del blanco^4 in dB
% Implementación de la ecuación (2.17)
num = p_peak + g + g + lambda_sqdb + sigmadb;

den = four_pi_cub + k_db + te_db + b_db + nf + loss + range_pwr4_db;
snr = num - den;
return

```

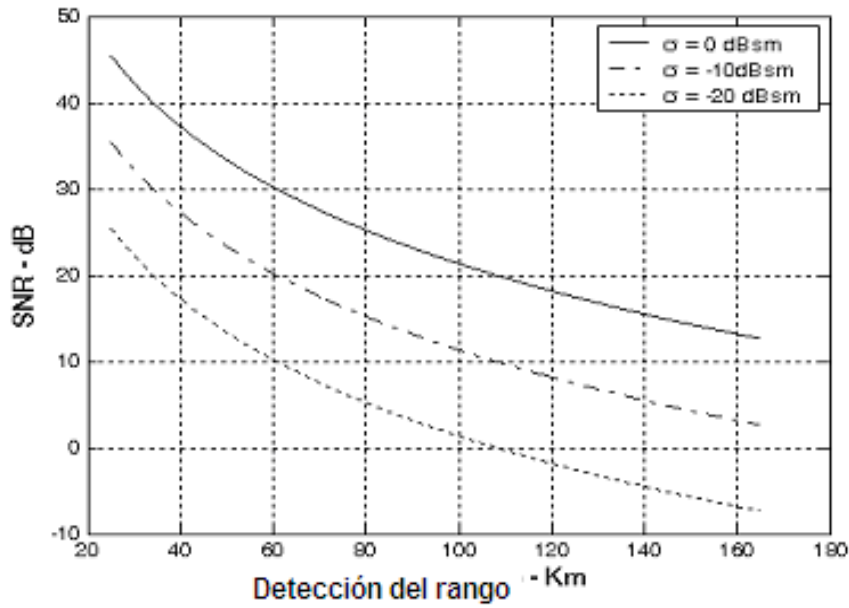


Figura 2.5 Curva resultante del cálculo de la ecuación del rango

Datos del cálculo del rango para 100 puntos en un blanco que está ubicado entre 5 Km y 80 Km de distancia del radar .

Respuesta obtenida para el programa:

>>

ans =

Columns 1 through 8

75.4332 74.4774 73.5714 72.7103 71.8899 71.1065 70.3569 69.6383

Columns 9 through 16

68.9483 68.2846 67.6453 67.0288 66.4334 65.8577 65.3005 64.7606

Columns 17 through 24

64.2370 63.7286 63.2348 62.7546 62.2873 61.8323 61.3889 60.9565

Columns 25 through 32

60.5346 60.1227 59.7204 59.3271 58.9426 58.5664 58.1982 57.8376

Columns 33 through 40

57.4843 57.1381 56.7987 56.4657 56.1391 55.8184 55.5036 55.1943

Columns 41 through 48

54.8905 54.5919 54.2984 54.0097 53.7257 53.4463 53.1714 52.9007

Columns 49 through 56

52.6341 52.3716 52.1130 51.8582 51.6071 51.3596 51.1155 50.8748

Columns 57 through 64

50.6374 50.4033 50.1722 49.9441 49.7190 49.4968 49.2774 49.0608

Columns 65 through 72

48.8468 48.6354 48.4265 48.2202 48.0162 47.8146 47.6154 47.4183

Columns 73 through 80

47.2235 47.0309 46.8404 46.6519 46.4655 46.2810 46.0985 45.9179

Columns 81 through 88

45.7391 45.5622 45.3870 45.2136 45.0419 44.8719 44.7035 44.5368

Columns 89 through 96

44.3716 44.2080 44.0459 43.8853 43.7262 43.5686 43.4123 43.2574

Columns 97 through 100

43.1040 42.9518 42.8010 42.6515

Estos datos representan los diferentes rangos que se ha obtenido en cada uno de los 100 puntos impuestos en el programa.

## 2.4 ANÁLISIS Y CÁLCULO DEL PRF.

El PRF significa Pulse Repetition Frequency es decir la frecuencia con la que se repiten los pulsos que genera el transmisor en un radar pulsado, este es uno de los parámetros importantes para el funcionamiento del radar, para el cálculo del PRF interviene la frecuencia de la transmisión del radar donde se obtiene la siguiente expresión:

$$PRF = \frac{1}{F} \text{ [PS]} \quad \text{Pulsos por segundo} \quad \text{Ec. 2.18}$$

De la cual se puede obtener otros parámetros del radar que también son importantes como el PRI (Pulse Repetition Interval) o también el periodo (T).

$$PRF = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{T} \quad \text{Ec.}$$

2.19

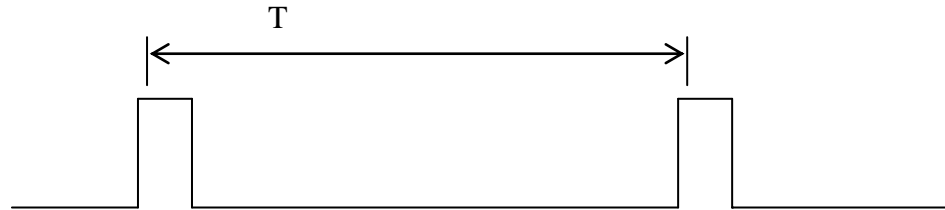


Figura 2.6 Tren de pulsos de transmisión

Cada radar tiene su firma electrónica o sus características propias que le identifican, el tipo de radar para la función para la cual ha sido diseñado el PRF es un parámetro que determina el alcance o rango del radar, por esta razón, para ejemplo en el cálculo del rango se utiliza la expresión o ecuación del radar en la que interviene el PRF.

Los sistemas radáricos actuales están diseñados para tener la posibilidad seleccionar uno o más PRF's, esto depende para lo que el radar sea utilizado, por ejemplo: El LOWPRF es utilizado para radares de vigilancia a larga distancia, el HIGHPRF sirve para realizar la vigilancia a distancia cortas, pero además tiene la facilidad de mover el haz de radiación para mirar hacia áreas cercanas al radar llamado LOOKDOWN.

Considerando esta información y dada la importancia de este parámetro de funcionamiento del radar se implementa un programa para calcular el PRF y la curva que relaciona el rango de alcance y la relación señal – ruido SNR.

$$SNR = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 k T_e B G L R^4} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Para el cálculo de esta ecuación se utiliza del programa MATLAB con la función “lprf\_req.m” para lo cual se consideran los parámetros :

function [snr \_ out] = lpr f \_ req (pt, freq, g, sigma, te, b, nf, loss, range, prf, np, rcs \_ delta, pt \_ percent, np1, np2)

**Tabla 2.2 Parámetros del Programa para calcular la ecuación del Radar en función del LOW-PRF**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>ESTADO</b>
Pt	Potencia pico	Kw	entrada
Freq	frecuencia	Hz	entrada
G	Ganancia antena	dB	entrada
Sigma	Sección del blanco	M2	entrada
Te	Temp. Efectiva	Kelvin	entrada
B	Ancho de banda	Hz	entrada
Nf	Figura de ruido	dB	entrada
Loss	Pérdida radar	dB	entrada
Range	Rango del blanco	Km	entrada
Prf	PRF	pps	entrada
Np	Número de pulsos	none	entrada
np1	Elegir 1 pulso	none	entrada
np2	Elegir 2 pulso	none	entrada
Rcs_delta1	rsc delta1(sigma-delta1)	dB	entrada
Pt_percent1	Pt*pt_percent1%	none	entrada
Snr_out	SNR	dB	salida

### **PROGRAMA PARA CALCULAR EL PRF**

```

% Este programa implementa la ecuación del radar para el LOWPRF
function [snr_out] = lprf_req(pt, freq, g, sigma, te, b, nf, loss, range,...
    prf, np, rcs_delta, pt_percent, np1, np2)
% Esta función implementa la ecuación del radar con LOW PRF.
c = 3.0e+8;
function [snr_out] = lprf_req_gui(pt, freq, g, sigma, te, b, nf, loss, range,...
    prf, np, rcs_delta, pt_percent, np1, np2)
% Esta función implementa la ecuación del radar con LOW PRF
c = 3.0e+8;
pt = 1e+6; % Potencia Pico en Watts
freq = 5.6e+9; % Frecuencia de operación del radar en Hz.
g = 40.0; % ganancia de la antena en dB
sigma = 0.1; % radar cross section en metros cuadrados
te = 400.0; % Temperatura efectiva del ruido en grados en Kelvins
b = 5.0e+6; %Ancho de banda de operación del radar en Hz
nf = 3.0; %Figura del ruido en dB
loss = 1.0; % Pérdidas del radar in dB
np = 1; % 1 numero de pulsos integrados de coherencia
prf = 100 ; % PRF en Hz
range = 250.0; %Rango del blanco en Km
np1 = 10;
np2 = 100;
rcs_delta = 10;
pt_percent = 2.;
lambda = c / freq;

```

```

p_peak = base10_to_dB(pt);
lambda_sq = lambda^2;
lambda_sqdb = base10_to_dB(lambda_sq);
sigmadb = base10_to_dB(sigma);
for_pi_cub = base10_to_dB((4.0 * pi)^3);
k_db = base10_to_dB(1.38e-23);
te_db = base10_to_dB(te)
b_db = base10_to_dB(b);
np_db = base10_to_dB(np);
range_db = base10_to_dB(range * 1000.0);
% Implementa la Ec. Eq. (2.20)
snr_out = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + np_db - ...
    for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db
index = 0;
n1 = np_db;
n2 = base10_to_dB(np1);
n3 = base10_to_dB(np2)
for range_var = 25:5:400
    index = index + 1;
    rangevar_db = base10_to_dB(range_var * 1000.0);
    snr1(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + n1 - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * rangevar_db;
    snr2(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + n2 - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * rangevar_db;
    snr3(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + n3 - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * rangevar_db;
end
figure(1)
var = 25:5:400;
plot(var,snr1)
xlabel ('Range - Km');

ylabel ('SNR - dB');
sigma5 = sigmadb - rcs_delta;
pt05 = p_peak + base10_to_dB(pt_percent);
index = 0;
for nvar =1:10:500
    index = index + 1;
    ndb = base10_to_dB(nvar);
    snrs(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0* range_db;
    snrs5(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigma5 + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;
end
index = 0;
for nvar =1:10:500
    index = index + 1;
    ndb = base10_to_dB(nvar);
    snrp(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;

```

```

    snrp5(index) = pt05 + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;
end
nvar = 1:10:500;
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(nvar,snrs)
xlabel ('numero de pulsos integrados coherentes');
ylabel ('SNR - dB');
subplot(2,1,2)
plot(nvar,snrp)
xlabel ('numero de pulsos integrados coherentes');
ylabel ('SNR - dB');
return
lambda = c / freq;
p_peak = base10_to_dB(pt);
lambda_sq = lambda^2;
lambda_sqdb = base10_to_dB(lambda_sq);
sigmadb = base10_to_dB(sigma);
for_pi_cub = base10_to_dB((4.0 * pi)^3);
k_db = base10_to_dB(1.38e-23);
te_db = base10_to_dB(te)
b_db = base10_to_dB(b);
np_db = base10_to_dB(np);
range_db = base10_to_dB(rango * 1000.0);
% Implementa la ecuación ( 2.20 )
snr_out = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + np_db - ...
    for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db
% Genera la figura 2.6
index = 0;
n1 = np_db;
n2 = base10_to_dB(np1);
n3 = base10_to_dB(np2)
for range_var = 25:5:400
    index = index + 1;
    rangevar_db = base10_to_dB(range_var * 1000.0);
    snr1(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + n1 - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * rangevar_db;
    snr2(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + n2 - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * rangevar_db;
    snr3(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + n3 - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * rangevar_db;
end
figure(2)
var = 25:5:400;
plot(var,snr1,var,snr2,var,snr3)
xlabel ('Range - Km');
ylabel ('SNR - dB');
legend('np','np1','np2');
% titulo ('np = 1, np1 = 10, np2 = 100');

```



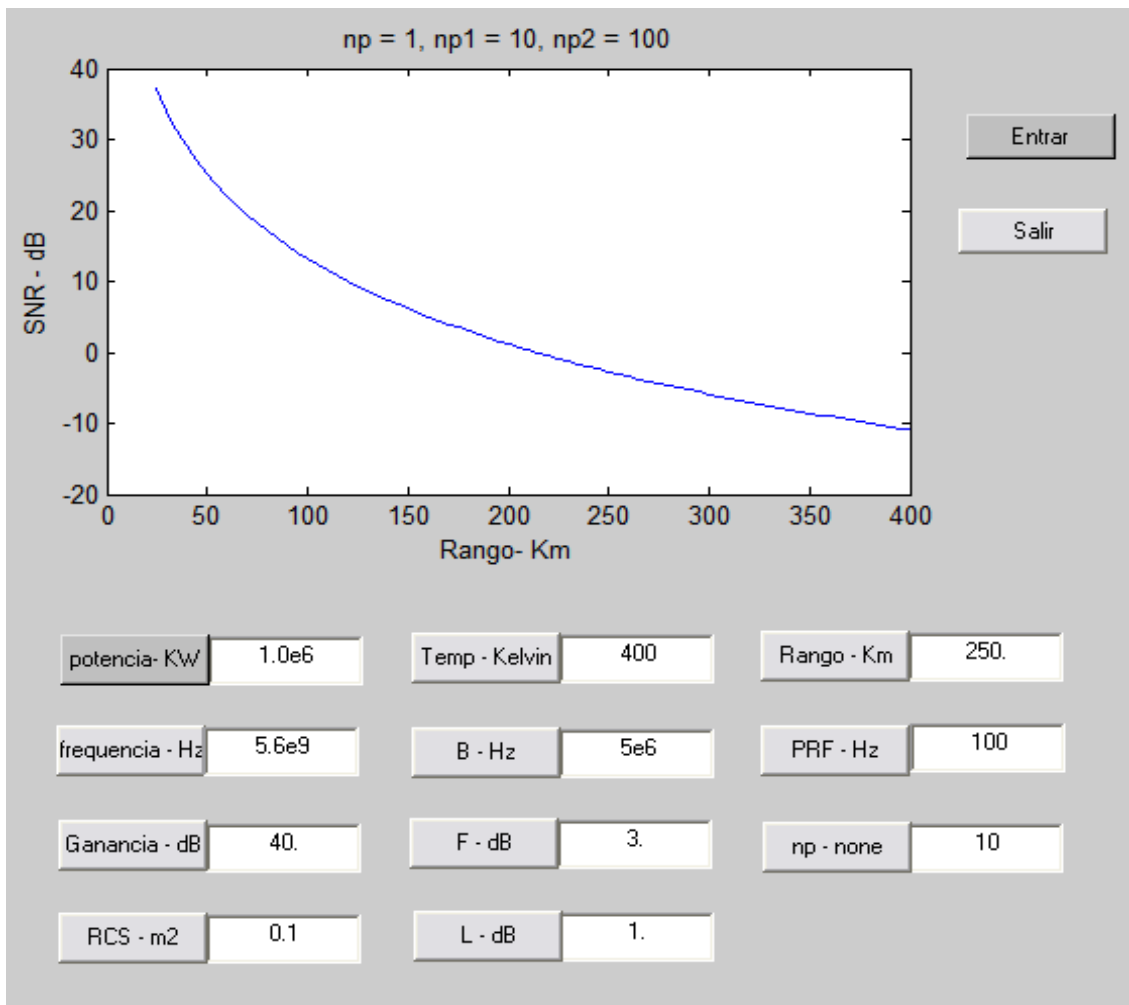
```

% Genera la figura 2.6
sigma5 = sigmadb - rcs_delta;
pt05 = p_peak + base10_to_dB(pt_percent);
index = 0;
for nvar = 1:10:500
    index = index + 1;
    ndb = base10_to_dB(nvar);
    snrs(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;
    snrs5(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigma5 + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;
end

index = 0;
for nvar = 1:10:500
    index = index + 1;
    ndb = base10_to_dB(nvar);
    snrp(index) = p_peak + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;
    snrp5(index) = pt05 + 2. * g + lambda_sqdb + sigmadb + ndb - ...
        for_pi_cub - k_db - te_db - b_db - nf - loss - 4.0 * range_db;
end

nvar = 1:10:500;
figure(3)
subplot(2,1,1)
plot(nvar,snrs,nvar,snrs5)
legend('default RCS','RCS-delta')
xlabel ('numero de pulsos integrados coherentes');
ylabel ('SNR - dB');
%titulo ('delta = 10dBsm, percent = 2.0');
subplot(2,1,2)
plot(nvar,snrp,nvar,snrp5)
legend('potencia preestablecida ','pt * percent')
xlabel ('numero de pulsos integrados coherentes');
ylabel ('SNR - dB');
return

```



**Figura 2.7** Interfase gráfica para ingresar datos para el cálculo del rango a partir del PRF

## 2.5 RESOLUCIÓN DEL RANGO

La resolución del rango  $\Delta R$  es la habilidad de un radar para detectar dos blancos lo mas próximos posible entre ellos.

Los sistemas radáricos son normalmente diseñados para operar en un rango mínimo  $R_{min}$ . y un rango máximo  $R_{max}$ ., la distancia entre  $R_{min}$  y  $R_{max}$  es igual  $\Delta R$ .

Los blancos separados en un  $\Delta R$  o espacio amplio pueden ser identificados fácilmente, pero para los blancos que se encuentra en el mismo rango, la información obtenida requiere ser procesada utilizando técnicas de procesamiento de señales. Pero si dos blancos se encuentran localizados en diferentes rangos

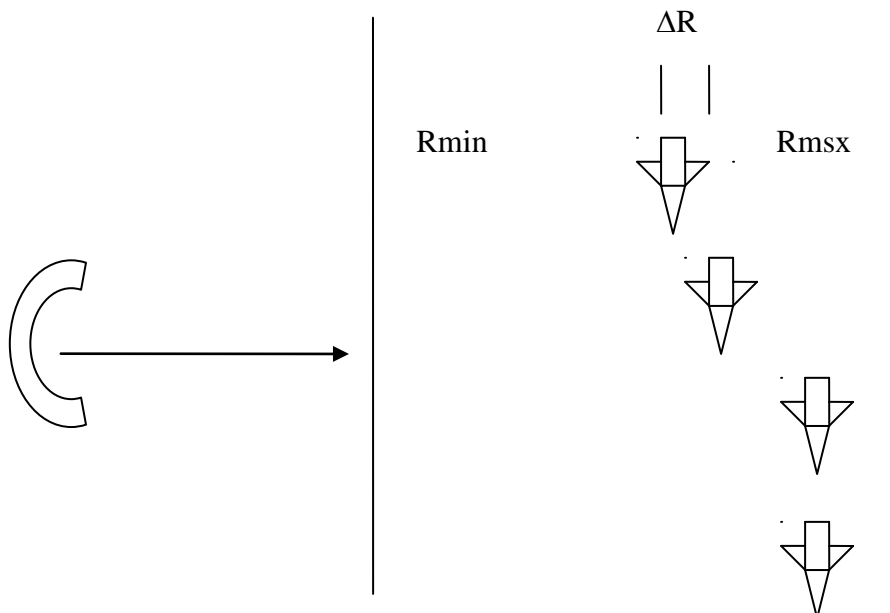
$R_1$  y  $R_2$ , estos tendrán un tiempo de retardo el uno respecto al otro, como resultado del calculo de matemático se obtendrá una distancia llamada resolución de rango o discriminación entre blancos detectados ( $\Delta R$ ).

La ecuación 2.21 expresa la variación de la resolución de los rangos entre las aeronaves, diferenciados en la detección del radar.

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \frac{C(2 - t_1)}{2} \quad \text{Ec. 2.21}$$

y tomando en cuenta el parámetro RCS se tiene lo siguiente :

$$\Delta R = \frac{C\sigma_t}{2} \quad \text{Ec. 2.22}$$



**Figura 2.8** Gráfica de la posición de las aeronaves para determinar la resolución del rango

En general, los usuarios de los radares y los diseñadores buscan minimizar el  $\Delta R$  para mejorar el rendimiento del radar. Por lo que para obtener un  $\Delta R$  pequeño es necesario minimizar u obtener un ancho de pulso corto pero esto producirá la reducción de la potencia promedio del transmisor y aumentará el ancho de banda. Por tal razón, para obtener una fina resolución de rango sin afectar al resto de parámetros se utiliza técnicas de compresión de pulso.

Para facilitar el cálculo de la resolución de rango se utiliza el programa MATLAB con la función “range\_resolution.m”.

**Tabla 2.3** Parámetros para el programa de la resolución del rango.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ESTADO
var Indicator	Ancho de banda	Hz	Entrada
var Indicator	Ancho de pulso	seg	entrada
delta _R	Resolución de rango	m	salida

Para entender un poco mejor ponemos un ejemplo para calcular manualmente los parámetros de un sistema radárico de 100 Km de alcance y un ancho de banda de 0.5Mhz. Con esto se calcula el PRF, PRI,  $\Delta R$  y ancho del pulso.

$$\text{PRF} = c / 2R = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^5} = 1500 \text{ hZ} \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$\text{PRI} = 1 / \text{PRF} = 1 / 1500 = 0,6667 \text{ ms}$$

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

$$\Delta R = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 0,5 \times 10^6} = 300 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.24}$$

$$\tau = 2\Delta R / c \quad \text{Ec. 2.25}$$

$$\tau = \frac{2 \times 300}{3 \times 10^8} = 2 \mu\text{s}$$

Utilizando MATLAB con la función [ delta\_R ] = resolución de rango ( bandwidth, indicador)

#### PROGRAMA RADAR CALCULAR LA RESOLUCIÓN DEL RANGO

*% Esta función calcula la resolución de rango del radar en metros*

*% El ancho de banda en Hz ==> indicador = segundos*

*c = 3.e+8;*

*If (indicador == 'hz')*

*delta \_R = c \* bandwidth / 2.0;*

*end*

*return*

## CAPÍTULO III

### PARAMETROS DEL RADAR EN MATLAB

#### 3.1 ARREGLO DE ANTENAS

Las antenas del radar pueden caracterizarse por la ganancia directiva GD,

ganancia de potencia y apertura efectiva Ae. La ganancia de la antena es un término usado para definir la capacidad de una antena, para concentrar la energía transmitida en un cierto momento.

La ganancia directiva o simplemente directividad es la más representativa de los patrones de radiación, esta ganancia de potencia es usada en la ecuación del radar, en la ganancia de potencia y directividad. Cuando se ha normalizado, ésta es llamada patrón de radiación de la antena; la directividad de la antena puede ser definida por :

$$Gd = \frac{\text{Max.int ensidadrad.}}{\text{Intensidadpromediaradar}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$Gd = \frac{4\pi}{\theta_3\phi_3} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde  $\theta_3$  y  $\Phi_3$  son los puntos de mitad de potencia (3dB) del ancho de banda en cada dirección.

Aérea de la apertura de la antena

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad \text{Ec. 3.3}$$

La ganancia de la antena es igual a:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$A_e$  = Apertura efectiva de la antena

$\lambda$  = Longitud de onda del pulso de transmisión

### 3.2 CAMPOS CERCANOS Y LEJANOS

La intensidad del campo electrónico generado por la energía emitida por una antena, está en función de la forma física de la apertura de la antena y de la amplitud de la corriente eléctrica, así como por la distribución de la fase a través de la apertura de la antena.

Basada en la distancia desde la cara de antena donde es medido el campo eléctrico, tres regiones distintas son identificadas. Éstas son las del campo cercano, Fresnel y las regions Fraun Hofer.

En las regiones de NEAR FIELD y de Fresnel los rayos u ondas emitidas desde la antena son de forma esférica, así mismo en las

regiones Fraun Hofer las formas pueden ser representadas como ondas planas.

Normalmente en pocas aplicaciones de los radares se utiliza las regiones de campos cercanos y Fresnel. La mayoría de los radares operan en al región de Fraun Hofer, la cual es conocida como la región de campo lejano FAR FIELD.

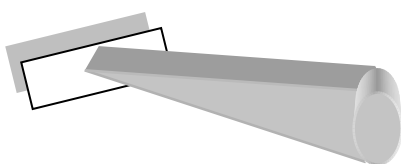
La intensidad del campo electrónico puede ser calculado a partir de la apertura de la antena con la transformada de Fourier.

En general un arreglo de antenas puede caracterizarse por el factor del campo eléctrico, ésto se demuestra mientras se conoce el factor de arreglo, dado por el diseñador y por el conocimiento de sus características que son:

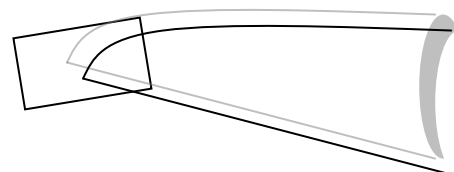
- Ancho del lóbulo de  $-3\text{dB}$ .
- Null to Null del lóbulo.
- La distancia desde el pico principal al primer lóbulo lateral.
- La comparación del primer lóbulo lateral al lóbulo principal.
- Localización de los Nulls.
- Disminución de los lóbulos laterales.
- Localización de los lóbulos.

### 3.3 TIPOS DE ARREGLOS

Existen varios tipos de arreglos entre los cuales tenemos los siguientes:



LÓBULO TIPO LAPIZ



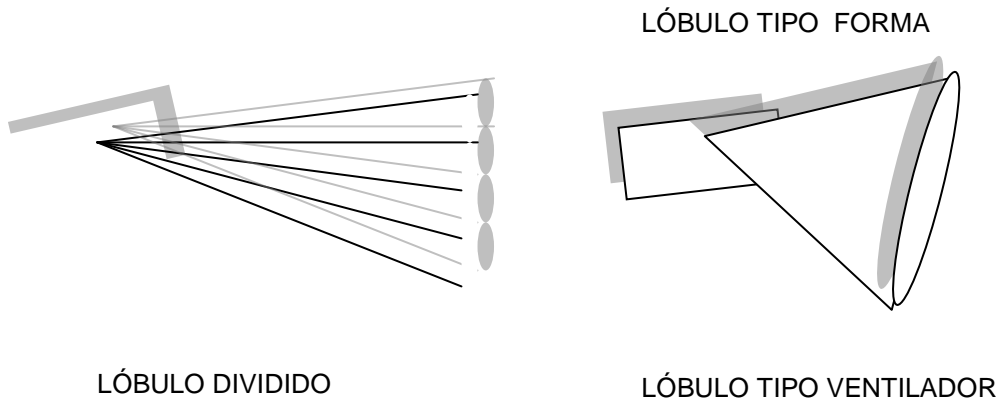
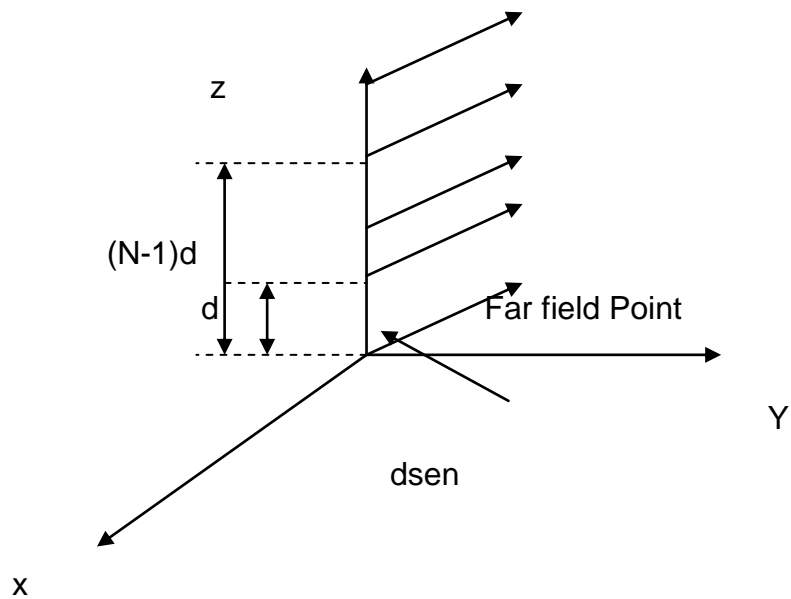


Figura 3.1 Arreglo de Lóbulos

### 3.3.1 ARREGLOS LINEALES

El arreglo lineal consiste en  $N$  elementos idénticos de una antena, el espacio entre cada elemento es  $d$  (unidades de longitud de onda). En la figura 3.2 se presenta el elemento # 1 como un referente del arreglo. Graficando geoméricamente los arreglos a una misma distancia se tiene que:





**Fig.3.2 Arreglo lineal de N elementos de igual distancia**

Luego de los cálculos realizados considerando que cada elemento es independiente y combinando la fase Far Field point obtenemos la siguiente ecuación 3.5 que representa a la intensidad del patrón campo lejano ó Far Field.

$$|E(\text{sen } \psi)| = \sqrt{E(\text{sen } \psi)E^*(\text{sen } \psi)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

El valor máximo de  $|E(\text{sen } \psi)|$  es igual a.

$$|E_n(\text{sen } \psi)| = \frac{1}{N} \left| \frac{\text{sen}((Nkd\text{sen } \psi)/2)}{\text{sen}((kd\text{sen } \psi)/2)} \right| \quad \text{Ec. 3.6}$$

Normalizando al patrón del arreglo en las dos vías ( ida y vuelta) se tiene que:

$$G(\text{sen } \psi) = \frac{1}{N^2} \left( \frac{\text{sen} \left[ \frac{Nkd}{2}(\text{sen } \psi - \text{sen } \psi_0) \right]}{\text{sen} \left[ \frac{kd}{2}(\text{sen } \psi - \text{sen } \psi_0) \right]} \right)^2 \quad \text{Ec. 3.7}$$

El patrón de radiación  $G(\text{Sen } \Psi)$  tiene simetría cilíndrica en el componente de las X ( $\text{Sen } \Psi=0$ ) y es independiente del ángulo azimutal, y es determinado completamente por valores en el intervalo ( $0 < \Psi < \pi$ ).

El lóbulo principal de un arreglo puede ser electrónicamente dirigido variando la fase de la corriente aplicada a cada elemento.

Dirigiendo el lóbulo principal en la dirección del Seno, con el Sen  $\Psi$  se está logrando hacer diferenciar la fase entre cada dos elementos adyacentes iguales a  $K d \text{ Sen } \Psi_0$ . En este caso la radiación normalizada del patrón puede ser escrita como.

$$G(\text{sen } \psi) = \frac{1}{N^2} \left( \frac{\text{sen } \left[ \frac{Nkd}{2} (\text{sen } \psi - \text{sen } \psi_0) \right]}{\text{sen } \left[ \frac{kd}{2} (\text{sen } \psi - \text{sen } \psi_0) \right]} \right)^2 \quad \text{Ec.}$$

3.8

Si  $\Psi_0 = 0$  entonces el lóbulo principal es perpendicular al lóbulo de las X, y cuando el lóbulo esta apuntando a lo largo del eje de las X, es llamado "endfire array".

Programa MATLAB usando la función "linear\_array.m"

La función "linear\_array .m" calcula y gráfica la ganancia del patrón de una función real seno.

**Tabla3.1 Parámetros utilizados en la implementación de la función "linear\_array".**

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ESTADO
Nr	Número de elementos en el arreglo	Ninguna	Entrada
Dolr	Espacio de los elementos en unidades lambda	Ancho de onda	Entrada
Theta 0	Ángulo de elevación	Grados	
Finid	-1: Not use	Ninguna	
Win	Ventana para control de los lóbulos laterales	Ninguna	Entrada
Nbits	Negativo # use n bits nivel de Cuantificación Positivo # : usa $2^n$ bits	Ganancia del patrón	Salida

	niveles de cuantificación		
Theta	Ángulo de elevación real disponible	Grados	Salida
Patrónr	Patrón del arreglo	dB	Salida
Patrón g	Ganancia del Patrón	dB	Salida

Para estar en capacidad de cambiar cualquier dato en el diseño de un arreglo lineal, he diseñado una interfase que permita variar los diferentes datos, para lo cual se utiliza el mismo programa MATLAB basado en el GRAPHICAL USER INTERFASE (GUI).

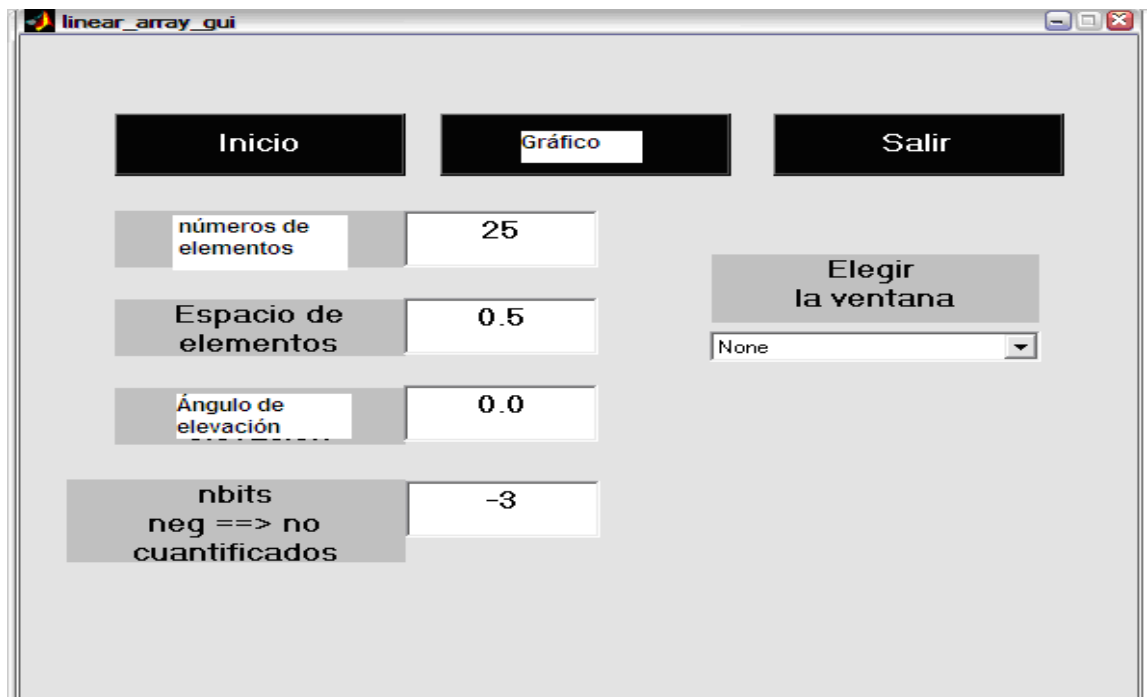
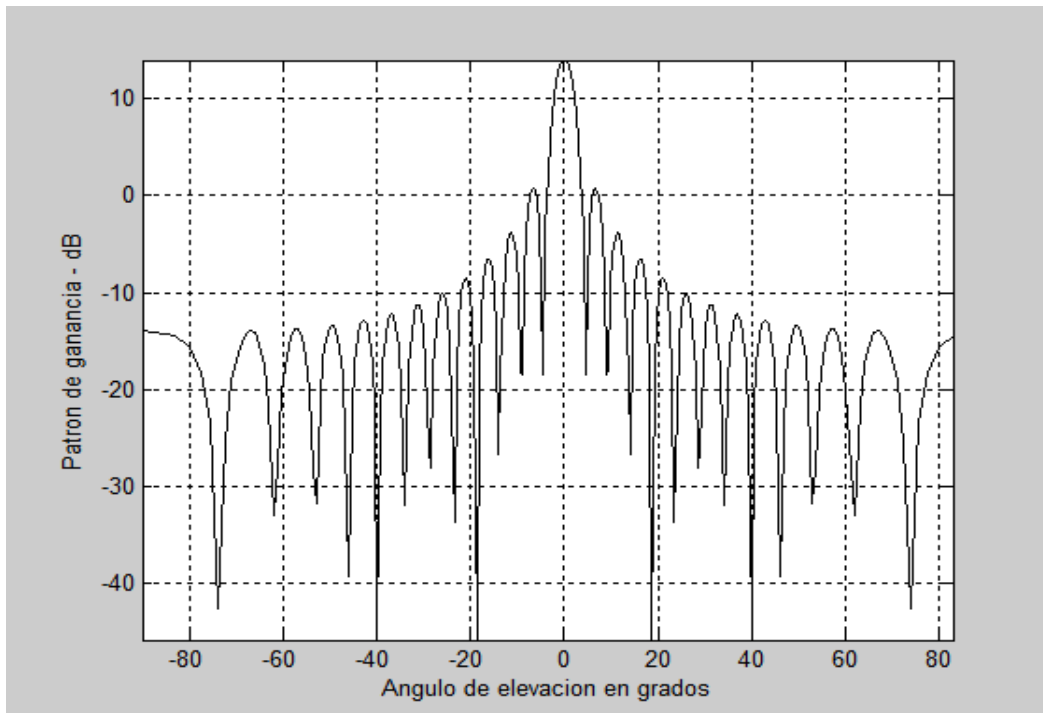


Figura 3.3 De la GUI para seleccionar las gráficas



**Figura 3.4** Gráfica que corresponde a la curva de un arreglo Hamming

A continuación se presenta el programa didáctico para objeto de la tesis. En el CD que acompaña a este trabajo, está el programa original para calcular y graficar un arreglo lineal con la interfase gráfica GUI para elegir el tipo de arreglo deseado.

```
function varargout = linear_array_gui(varargin)
% ARREGLO_ LINEAL_ GUI M-file for linear_array_gui.fig
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @linear_array_gui_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @linear_array_gui_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin & isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
```

```

    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
global Nr dolr theta0 nbits
% ---Ejecute antes para que sea visible linear_array_gui .
function linear_array_gui_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% Escoja el comando de salida para linear_array_gui
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% ---Las salidas de esta función son regresadas al comando de línea.
function varargout = linear_array_gui_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% Elegir el comando establecido para la salida de la estructura
varargout{1} = handles.output;

% ---Ejecute durante la creación de los objetos después de ajustar las
propiedades.
function InitializeToggleButton_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','black');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
        set(hObject,'BackgroundColor','black');

else
    set(hObject,'BackgroundColor' end

function InitializeToggleButton_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

'InitializeToggleButton_Callback'
set(handles.Nr,'String', num2str(25))
set(handles.dolr,'String',num2str(0.5))
set(handles.theta0,'String',num2str(0))
set(handles.nbits,'String',num2str(-1))
% --- Ejecuta durante la creación del objeto, después establece todas
las
% propiedades.
function PlotToggleButton_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
,get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor');
end
function PlotToggleButton_Callback(hObject, eventdata, handles)

'PlotToggleButton_Callback'
Nr = str2num(get(handles.Nr, 'String'))
dolr = str2num(get(handles.dolr, 'String'))
theta0 = str2num(get(handles.theta0, 'String'))
nbits = str2num(get(handles.nbits, 'String'))
winid = 1
win_type = get(handles.WindowChoice, 'Value')
switch win_type
case 1
win = ones(Nr, 1);
case 2
win = hamming(Nr) ;
case 3
win = hanning(Nr) ;
case 4
win = kaiser(Nr, pi) ;
case 5
win = blackman(Nr) ;
end

```

```

[theta,patternr,patterng] = linear_array(Nr,dolr,theta0,winid,win,nbits);
figure(1)
plot(theta,patterng,'k')
grid
xlabel('Steering angle - degrees')
ylabel('Gain pattern - dB')
axis tight

% --- Ejecuta durante la creación del objeto, después establece todas
las
% propiedades.
function QuitToggleButton_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','black');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
end
close all
clear all
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
end
function Nr_Callback(hObject, eventdata, handles)
urns contents of Nr as a double
Nr = str2double(get(hObject,'String'))
set(handles.Nr,'Value',Nr)

```

```

% --- Ejecuta durante la creación del objeto, después establece todas
las
% propiedades.
function dolr_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
end
dolr = str2double(get(hObject,'String'))
function theta0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
end
function theta0_Callback(hObject, eventdata, handles)
theta0 = str2double(get(hObject,'String'))

function nbits_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
end
function nbits_Callback(hObject, eventdata, handles)

```



```

% --- Ejecuta durante la creación del objeto, después establece todas
las
% propiedades.
function WindowChoice_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else

set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
;
end
'WindowChoice_CreateFcn'
% --- Ejecuta en la selección en el cambio de la elección de la ventana.
function [theta,patternr,patterng] =
linear_array(Nr,dolr,theta0,winid,win,nbits);
% Esta función calcula la ganancia del patrón de radiación de un arreglo
lineal
%Utiliza la FFT para calcular el patrón
eps = 0.00001;
Nr = 25;

n = 0:Nr-1;
i = sqrt(-1);

dolr = 0.5;

theta0= 0;

winid = -1;
win = -1;
nbits = -3;

%if dolr is > 0.5 then; escoja dol = 0.25 y calcule el nuevo N

```

```
if(dolr <=0.5)
```

```
    dol = dolr;
```

```
    N = Nr;
```

```
else
```

```
    ratio = ceil(dolr/.25);
```

```
    N = Nr * ratio;
```

```
    dol = 0.25;
```

```
end
```

```
%Escoja el tamaño apropiado fft, para un mínimo valor escoja 256
```

```
Nrx = 10 * N;
```

```
nfft = 2^(ceil(log(Nrx)/log(2)));
```

```
if nfft < 256
```

```
    nfft = 256;
```

```
end
```

```
% Convertir el ángulo de elevación en radianes y calcule el seno del ángulo
```

```
theta0 = theta0 * pi / 180.;
```

```
sintheta0 = sin(theta0);
```

```
% Determine y calcule el ángulo de elevación
```

```
if nbits < 0
```

```
    phase0 = exp(i*2.0*pi .* n * dolr * sintheta0);
```

```
else
```

```
    % Calcule y sume la fase los términos (Con cuantificación de nbits )
```

```
    % Use fórmula thetal = (2*pi*n*dol) * seno (theta0) dividido into 2^nbits
```

```
    levels = 2^nbits;
```

```
    qllevels = 2.0 * pi / levels; % compute quantization levels
```

```
    % Calcule el nivel de la fase de cada elemento
```

```
    angleq = round(dolr .* n * sintheta0 * levels) .* qllevels; % vector de posibles ángulos
```

```

phase0 = exp(i*angleq);
end

% Genere un arreglo de elementos con o sin ventana
if winid < 0
    wr(1:Nr) = 1;
else
    wr = win';
end

% sume la fase los términos
wr = wr .* phase0;

% determine la interpolación si es necesario (i.e N > Nr)
if N > Nr
    w(1:N) = 0;
    w(1:ratio:N) = wr(1:Nr);
else
    w = wr;
end

% Calcule el seno (theta) en un real espacio que corresponda a la FFT
arg = [-nfft/2:(nfft/2)-1] ./ (nfft*dol);
idx = find(abs(arg) <= 1);
sinetheta = arg(idx);
theta = asin(sinetheta);
% convierta el ángulo en grados
theta = theta .* (180.0 / pi);
% calcule fft of w (patron de radiación)
patternv = (abs(fftshift(fft(w,nfft))))).^2;
% convierta el patrón de radiación a dbs
patternr = 10*log10(patternv(idx) ./Nr + eps);
% Calcule la ganancia directiva del patrón
rbarr = 0.5 *sum(patternv(idx)) ./ (nfft * dol);
patterng = 10*log10(patternv(idx) + eps) - 10*log10(rbarr + eps);

```

return

### 3.3.2 ARREGLO PLANAR

Los arreglos planares son una extensión natural de los arreglos lineales, los cuales pueden tomar varias configuraciones, dependiendo del espacio y distribución, la cual es denominada grilla "GRID". Entre las formas se tiene las rectangulares, circulares, hexagonales, concéntricas, etc.

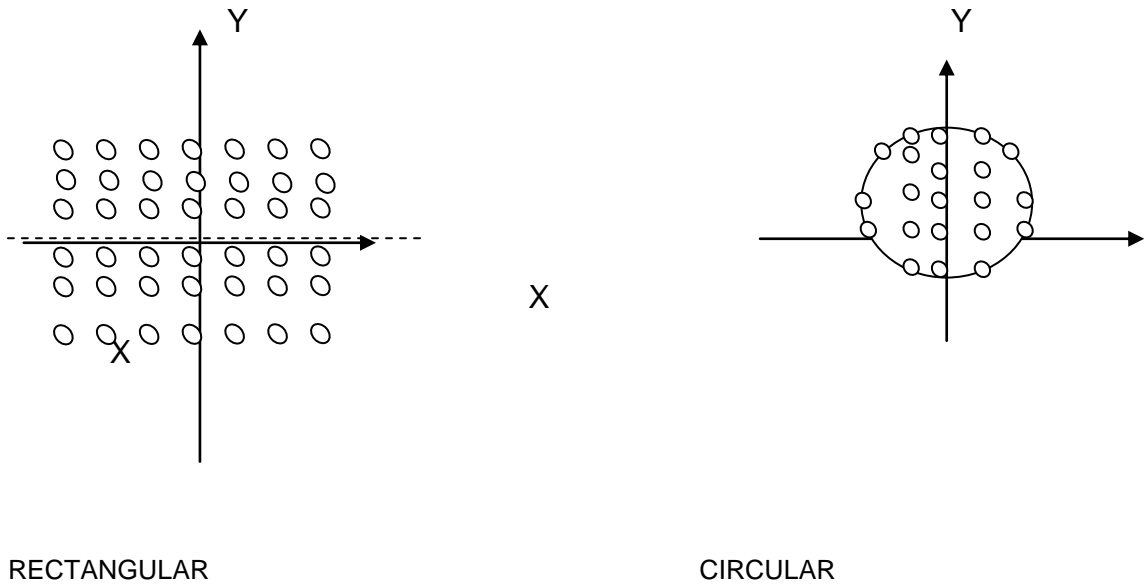


Figura 3.5 Arreglos circular y rectangular tipo grilla

### 3.3.3 ARREGLO CIRCULAR DE GRILLA

La geometría de interés se puede ver en la figura 3.4 en la cual se tiene que el radio es igual a  $\frac{1}{2} \sqrt{N}$  de N elementos.

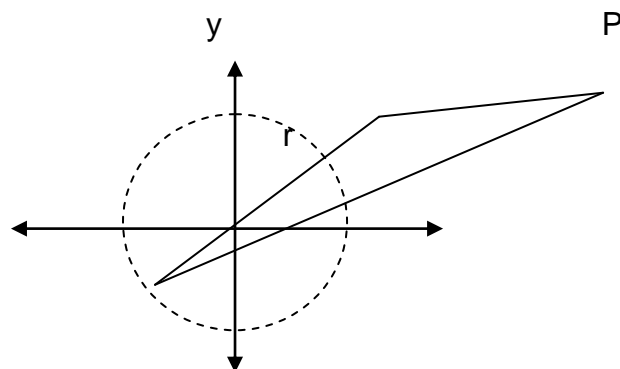


Figura 3.5 Geometría para un arreglo circular

Tomando como referencia un punto P hacia donde es dirigido el lóbulo principal

$$E = (\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n \exp \left\{ \frac{2\pi a}{\lambda} \left[ \cos \theta \cos(\Phi_n - \phi_o) - \sin \theta \cos(\Phi_n - \phi_o) \right] \right\}$$

Ec. 3.9

Programa 3.2 de la MAT LAB utilizando la función "Cir\_array.m"

```
%Arreglo circular en el plano x-y
% Los elementos son un dipolo corto paralelo al eje z
% 2D Patrones de radiación determinados para phi o theta
%%%% Las expresiones de los elementos necesitan ser modificados
si son diferentes
%%%% Dipolo corto de la antena a lo largo del eje z

% Limpie todo
clf
%cierre todo

% ===== Parámetros de entrada =====
a = 1.;      % radio del círculo
N = 10;     % Número de elementos del arreglo circular
theta0 = 45; % Dirección theta del lóbulo principal
```

```

phi0 = 60;    % Dirección Phi del lóbulo principal
% Theta ó Phi son variaciones de los cálculos del patrón del campo
lejano (far field pattern)
Variations = 'Phi'; % Selección correcta son 'Theta' or 'Phi'
phid = 60;    % Phi es constante y theta para variaciones
thetad = 45;  % Theta constante y phi para variaciones
% ===== Fin de la sección de los parámetros de entrada =====

```

```

dtr = pi/180;    % factores de conversión
rtd = 180/pi;
phi0r = phi0*dtr;
theta0r = theta0*dtr;
lambda = 1;
k = 2*pi/lambda;
ka = k*a;        % número de veces de las ondas del radio
jka = j*ka;
I(1:N) = 1;      % Excitación de los elementos en amplitud y fase
alpha(1:N) = 0;
for n = 1:N      % Posiciones de los elementos uniformemente
    distribuida a lo %largo del círculo
        phin(n) = 2*pi*n/N;
end

```

```

switch Variations

```

```

case 'Theta'

```

```

    phir = phid*dtr; % Patrón en una constante plano Phi
    i = 0;
    for theta = 0.001:1:181
        i = i+1;
        thetar(i) = theta*dtr;
        angled(i) = theta; angler(i) = thetar(i);
        Arrayfactor(i) = 0;
        for n = 1:N
            Arrayfactor(i) = Arrayfactor(i) + I(n)*exp(j*alpha(n)) ...

```

```

* exp( jka*(sin(thetar(i))*cos(phir -phin(n))) ...
-jka*(sin(theta0r )*cos(phi0r-phin(n))) );
end

```

```

Arrayfactor(i) = abs(Arrayfactor(i));
Element(i) = abs(sin(thetar(i)+0*dtr)); % evitar el uso de la función abs
end

```

```

case 'Phi'

```

```

thetar = thetad*dtr; % Patrón en una constante de plano theta

```

```

i = 0;

```

```

for phi = 0.001:1:361

```

```

    i = i+1;

```

```

    phir(i) = phi*dtr;

```

```

    angled(i) = phi; angler(i) = phir(i);

```

```

Arrayfactor(i) = 0;

```

```

    for n = 1:N

```

```

Arrayfactor(i) = Arrayfactor(i) + I(n)*exp(j*alpha(n)) ...

```

```

* exp( jka*(sin(thetar )*cos(phir(i)-phin(n))) ...
-jka*(sin(theta0r)*cos(phi0r -phin(n))) );
end

```

```

Arrayfactor(i) = abs(Arrayfactor(i));

```

```

Element(i) = abs(sin(thetar+0*dtr)); % use evitar el uso de la función
abs

```

```

end

```

```

angler = angled*dtr;

```

```

Element = Element/max(Element);

```

```

Array = Arrayfactor/max(Arrayfactor);

```

```

ArraydB = 20*log10(Array);

```

```

EtotalR =(Element.*Arrayfactor)/max(Element.*Arrayfactor);

```

```

figure(1)

```

```

plot(angled,Array)

```

```

ylabel('Patrón del arreglo')
grid
switch Variations
case 'Theta'
    axis ([0 180 0 1 ])
    % theta = theta +pi/2;
    xlabel('Theta [Grados]')
    title ( 'phi = 90^o plane')
case 'Phi'
    axis ([0 360 0 1 ])
    xlabel('Phi [Grados]')
    title ( 'Theta = 90^o plano')
end

figure(2)
plot(angled,ArraydB)
%axis ([-1 1 -60 0])
ylabel('Patrón de potencia [dB]')
grid;
switch Variations
case 'Theta'
    axis ([0 180 -60 0 ])
    xlabel('Theta [Grados]')
    title ( 'phi = 90^o plane')
case 'Phi'
    axis ([0 360 -60 0 ])
    xlabel('Phi [Grados]')
    title ( 'Theta = 90^o plano')
end

figure(3)
polar(angler,Array)
title ('Patrón del arreglo')
figure(4)
polardb(ángulo del arreglo)

```



```
title ('arreglo de la potencia [dB]')
figure(10)
subplot(2,2,1)
polardb (angler,Element,'b-'); % Patrón rectangular
title('Elemento normalizado E field [dB]')
subplot(2,2,2)
polardb(angler,Array,'b-')
title(' Factor normalizado del arreglo [dB]')
subplot(2,2,3)
polardb(angler,EttotalR,'b-'); % Gráfico polar
title('Total normalizado E field [dB]')
```

MAT LAB Funtcion “Cir\_array.com”

La función “Cir\_array.m” calcula y grafica la grilla rectangular con una antena de “arreglo circular boundary” de un patrón de ganancia en el espacio visible  $\mu, v..$

**Tabla 3.2 Parámetros de un arreglo circular.**

<b>SÍMBOLO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>ESTADO</b>
N	Número de elementos a lo largo del diámetro	Ninguna	Entrada
Dolx	Espacio d elementos en unidades lambda en X	Ancho de ondas	Entrada
Doly	Espacio del elemento en unidades de lambda en Y	Ancho de ondas	Entrada
Theta 0	Ángulo de elevación	Grados	
Phio	Ángulo de azimut	Grados	
Win	Ventana para control de los lóbulos laterales	Ninguna	Entrada
Nbits	Negativo # use h bits nivel de Cuantificación	Gancia del patrón	Salida
Amn	A (m,n) Secuencia definida	Ninguna	Salida

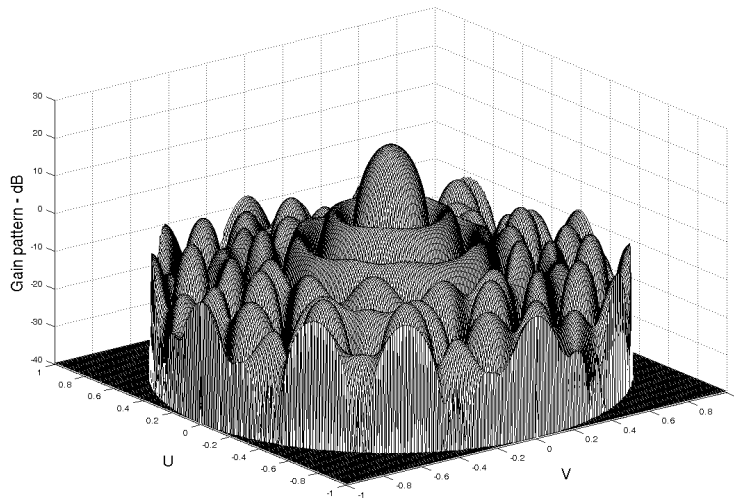


Figura 3.6 Patrón de ganancia 3D correspondiente a la ecuación 3.9

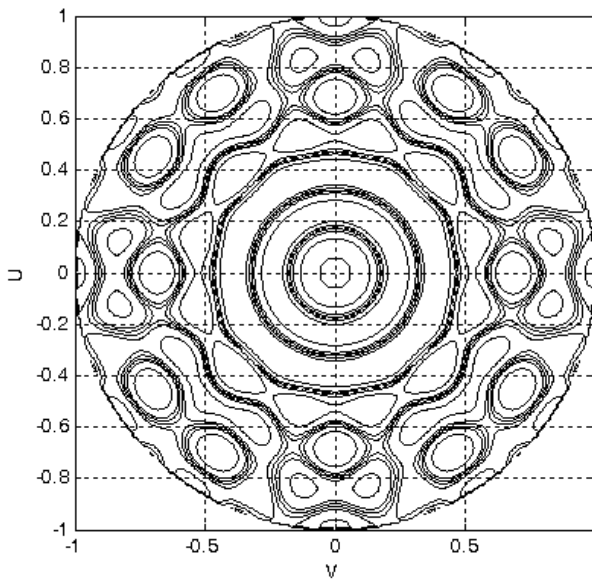


Figura 3.7 Gráfico del Contorno de la Ecuación 3.9

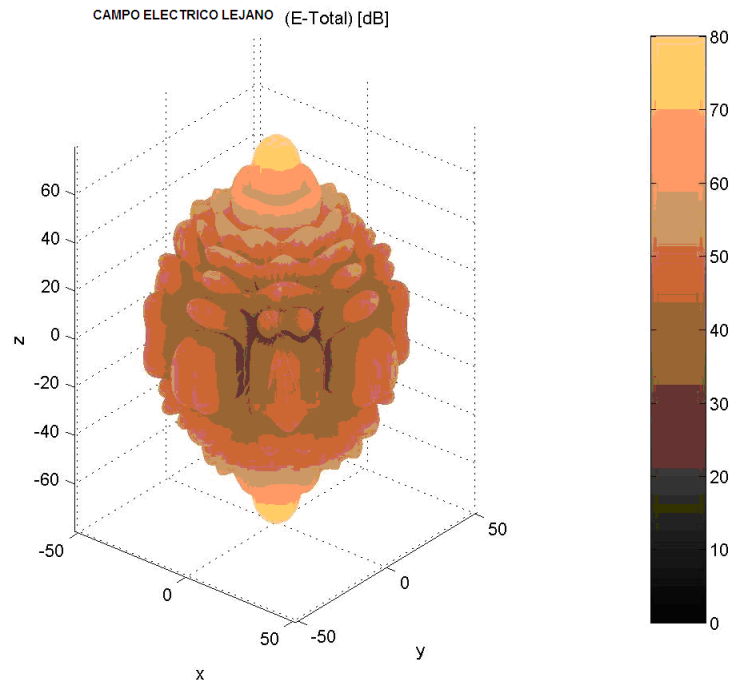


Figura 3.8 Gráfico 3D de la Ecuación 3.9

### 3.3.4 ARREGLO RECTANGULAR

Considerando que  $N \times M$  produce la grilla rectangular.  
 El punto P es proyectado por los vectores  $r_1; r_0$ .  
 Campo eléctrico lejano ( Far Field).

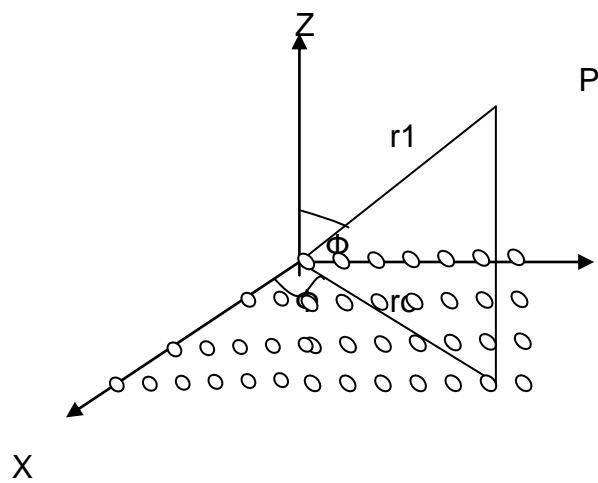


Figura 3.9 Geometría de un arreglo rectangular

La ecuación para calcular un arreglo rectangular esta dada por la ecuación 3.10:

$$E(\theta, \phi) = \left| \frac{\text{sen}((Nkd_x \text{sen} \theta \cos \phi) / 2)}{\text{sen}((kd_x \text{sen} \theta \cos \phi) / 2)} \right| \left| \frac{\text{sen}((Nkd_y \text{sen} \theta \text{sen} \phi) / 2)}{\text{sen}((kd_y \text{sen} \theta \text{sen} \phi) / 2)} \right| \quad \text{Ec.}$$

### 3.10

Utilizando la función de MAT LAB

Rect\_array .m.

La función "rect\_array .m" calcula y grafica la ganancia del patrón de una antena rectangular en el espacio visible UV dado por los siguientes parámetros.

[pattern]= rect\_array.m (Nxr, Nyr, dolxr, dolyr, theta0, Phi0, Winid, Win, nbits)

**Tabla 3.3 Parámetros de un arreglo rectangular para la función "rec\_array"**

SÍMBOL O	DESCRIPCIÓN	UNIDADE S	ESTAD O
Nxr	Número de elementos a lo largo X	ninguna	Entrada
Nyr	Número de elementos a lo largo del eje Y	ninguna	Entrada
Dolxr	Espacio del elemento en unidades lambda a lo largo del eje X	longitudinal	Entrada
Dolyr	Espacio del elemento en unidades lambda a lo largo del eje Y	longitudinal	Entrada
Theta0	Ángulo de elevación	Grados	Entrada

Phi0	Ángulo de azimut	Grados	Entrada
Finid	-1: Weighting is used 1: Weighting defined in win	Ninguno	Entrada
Win	Ventana para control de lóbulos laterales	Ninguno	Entrada
Nbits	Negativo # cuantificación perfecto Positivo # use 2 bits niveles de cuantificación	Ninguno	Entrada
Patrón	Ganancia del patrón	dB	Salida

Para trabajar con estas funciones se desarrollo en MATLAB un GUI WORK SPACE llamado "array.m", con el cual se puede generar los arreglos de patrones que se requiera, ingresando datos en cada uno de los parámetros.

#### PROGRAMA PARA GRAFICAR Y CALCULAR EL PATRÓN RECTANGULAR

```
function [pattern] = rect_array(Nxr,Nyr,dolxr,dolyr,theta0,phi0,winid,win,nbits);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%  
% Esta función calcula la ganancia del patrón de radiación de un  
arreglo planar graficado en tres dimensiones.  
% Esta función utiliza Fast FourierTransformr 2 (fft2) para calcular la  
salida.
```

%%%%%%%%%%%%%% \*\*\*\*\* ENTRADAS

\*\*\*\*\*

%%%%%%%%%%%%%%  
%%

*% Nxr ==> Número a lo largo del eje x; Nyr ==> número de elementos a la largo del eje y*

*% dolxr ==>espacio de elemento en dirección de x ; dolyr ==> espacio del elemento en dirección de y ambos en unidades de lambda*

*% theta0 ==> ángulo de elevación en grados, phi0 ==> azimut del ángulo de elevación en grados*

*% winid ==> identificador de ventana; winid negativo ==> no window ; winid*

*positivo ==> use la ventana dada por win*

*% win ==>Ventana de entrada de la función (2-D window) debería ser del tamaño %(Nxr X Nyr)*

*% Número de bits utilizados en la fase de cuantificación; nbits negativos ==> NO quantization*

%%%%%%%%%%%%%% \*\*\*\*\* SALIDAS

\*\*\*\*\*

%%%%%%%%%%%%%%  
%%

*% patrón ==> Patrón de ganancia direccional*

%%%%%%%%%%%%%% \*\*\*\*\*

%%%%%%%%%%%%%%  
%%

*eps = 0.0001;*

*Nxr = 15;*

*Nyr = 15;*

*dolxr = 0.5;*

*dolyr = 0.5;*

*theta0= 0;*

*phi0 = 0;*

```

winid = -1;
win = -1;
nbits = -3;
nx = 0:Nxr-1;
ny = 0:Nyr-1;
i = sqrt(-1);

% Verificar que el tamaño de la ventana es el misma que el tamaño del
arreglo.
[nw,mw] = size(win);
if winid >0
    if nw ~= Nxr
        fprintf('STOP == El tamaño de la ventana debe ser el mismo del
arreglo')
        return
    end
    if mw ~= Nyr
        fprintf('STOP == el tamaño de la ventana debe ser el mismo del
arreglo')
        return
    end
end
end

%if dol es > 0.5 luego; escoja dol = 0.5 y calcule el nuevo N

if(dolxr <=0.5)
    ratiox = 1 ;
    dolx = dolxr ;
    Nx = Nxr ;
else
    ratiox = ceil(dolxr/.5) ;
    Nx = (Nxr -1 ) * ratiox + 1 ;
    dolx = 0.5 ;
end
end

```



```

if(dolyr <=0.5)
    ratioy = 1 ;
    doly = dolyr ;
    Ny = Nyr ;
else
    ratioy = ceil(dolyr/.5) ;
    Ny = (Nyr -1) * ratioy + 1 ;

% determine la interpolación necesaria (i.e N > Nr)
if (Nx > Nxr) | (Ny > Nyr)
    for xloop = 1 : Nxr
        temprow = array(xloop, :) ;
        w( (xloop-1)*ratiox+1, 1:ratioy:Ny) = temprow ;
    end
    array = w;
else
    w = array ;
% w(1:Nx, :) = array(1:N,:);
end

% cálculo del patrón del arreglo
arrayfft = abs(fftshift(fft2(w,nfftx,nffty))).^2 ;

%calcule la matrix [su,sv]
U = [-nfftx/2:(nfftx/2)-1] ./ (dolx*nfftx);
indexx = find(abs(U) <= 1);
U = U(indexx);
V = [-nffty/2:(nffty/2)-1] ./ (doly*nffty);
indexy = find(abs(V) <= 1);
V = V(indexy);

%Generación del patrón de ganancia normalizado
rbar=sum(sum(arrayfft(indexx,indexy))) / dolx/doly/4./nfftx/nffty;
arrayfft = arrayfft(indexx,indexy) ./rbar;

```

```

[SU,SV] = meshgrid(V,U);
indx = find((SU.^2 + SV.^2) > 1);
arrayfft(indx) = eps/10;
pattern = 10*log10(arrayfft +eps);
figure(1)
mesh(V,U,pattern);
xlabel('V')
ylabel('U');
zlabel('Patrón de ganancia - dB')

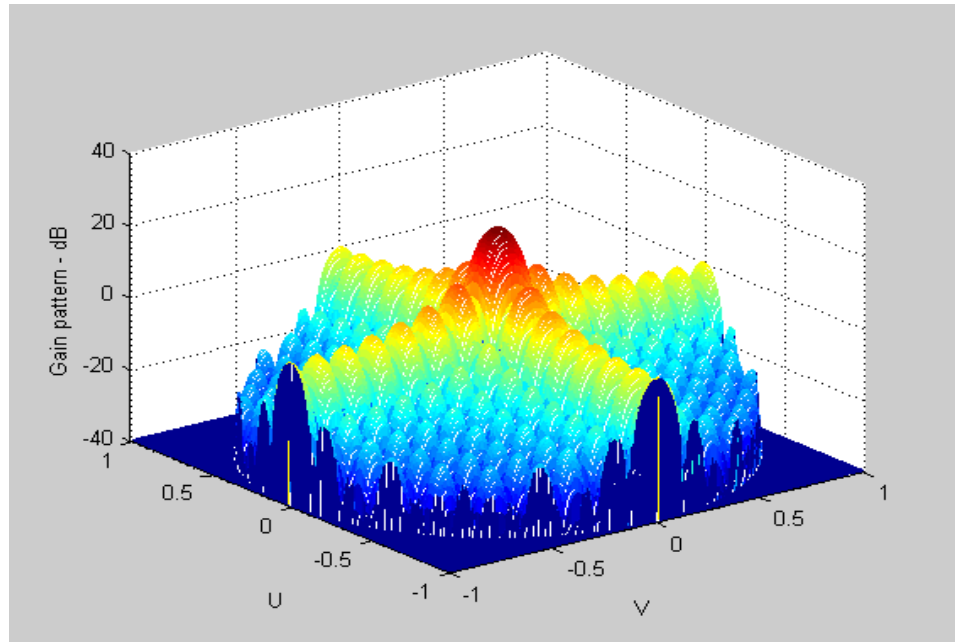
figure(2)
contour(V,U,pattern)
grid
axis image
xlabel('V')
ylabel('U');
axis([-1 1 -1 1])
figure(3)
x0 = (Nx+1)/2 ;
y0 = (Ny+1)/2 ;
radiusx = dolx*((Nx-1)/2) ;
radiusy = doly*((Ny-1)/2) ;
[xxx, yyy]=find(abs(array)>eps);
xxx = xxx-x0 ;
yyy = yyy-y0 ;
plot(yyy*doly, xxx*dolx, 'rx')
hold on
axis([-radiusy-0.5 radiusy+0.5 -radiusx-0.5 radiusx+0.5]);
grid
title('patrón del espaciado de la antena');
xlabel('y - \unidades lambdas')
ylabel('x - \unidades lambdas')
[xxx0, yyy0]=find(abs(array)<=eps);

```

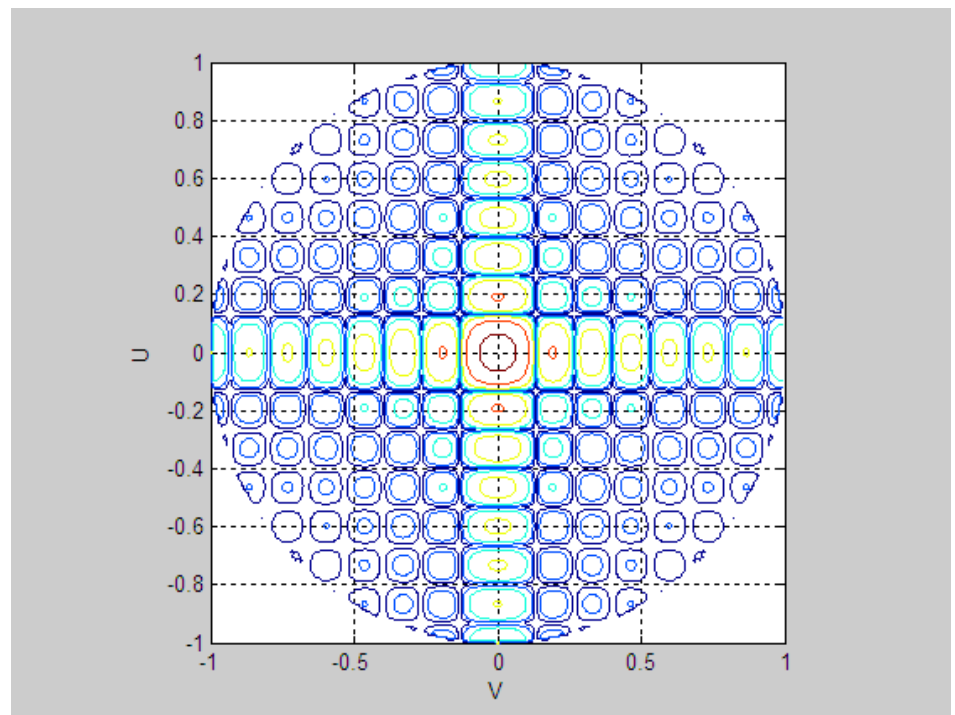
```
xxx0 = xxx0-x0 ;  
yyy0 = yyy0-y0 ;  
plot(yyy0*doly, xxx0*dolx,'co')  
axis([-radiusy-0.5 radiusy+0.5 -radiusx-0.5 radiusx+0.5]);  
hold off  
return
```

The screenshot shows a MATLAB GUI window titled "array" with a subtitle "Arreglo". The window contains several input fields and dropdown menus for configuring parameters. The parameters are: Nx (51), Ny (21), Ncirc (51), dolx (0.5), doly (0.5), theta0 (20 Grados), phi0 (30 Grados), and nbits (-1). There are also dropdown menus for "ventana" (set to NINGUNO) and "Patron del" (set to rectangular). At the bottom right, there are two buttons: "Plot" and "Salir".

Figura 3.10 Gráfico de la interfase de ingreso de los datos



**Figura 3.11** Gráfico tridimensional del patrón de radiación de ganancia.



**Figura 3.12** Gráfico del contorno correspondiente a la ganancia del patrón de radiación

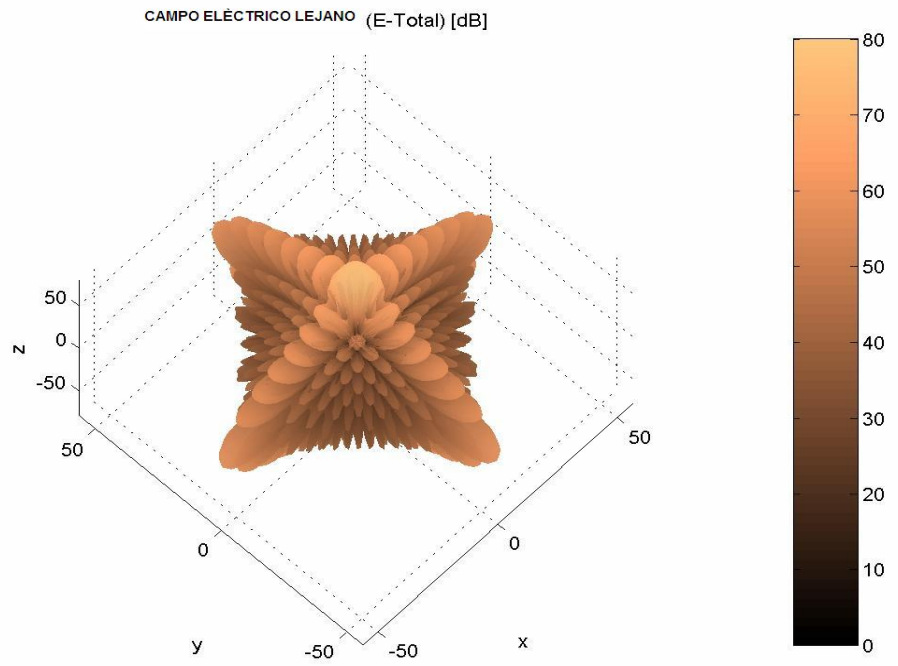


Figura 3.13 Gráfico tridimensional correspondiente a las coordenadas de  $\Theta_0$ ,  $\phi_0$

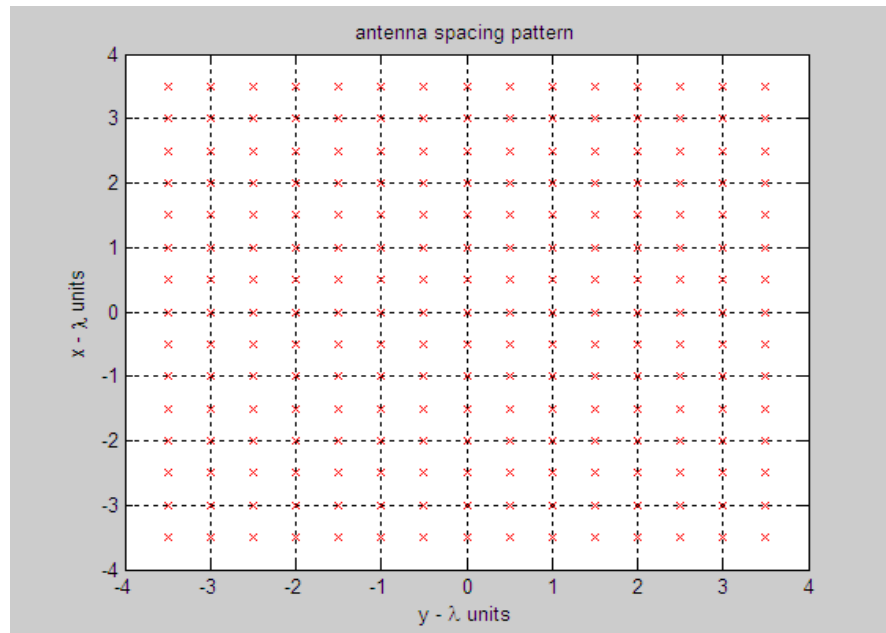


Figura 3.14 Patrón de los espacios de los elementos de la antena

### 3.4 RADAR CROSS SECTION

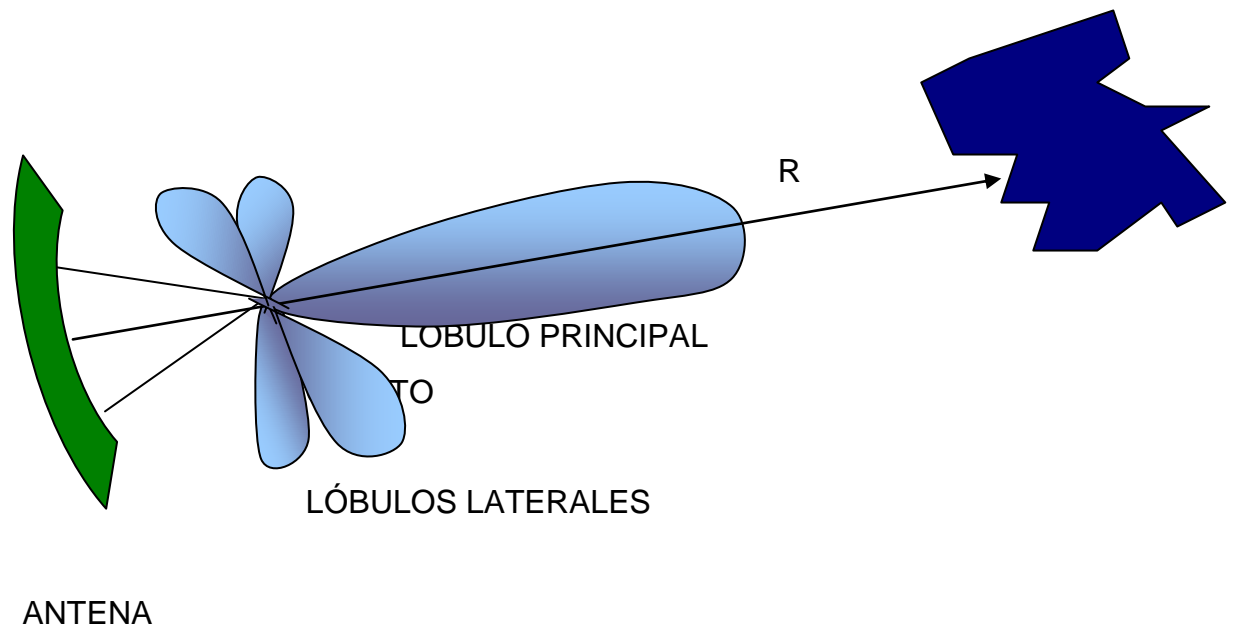
Las ondas electromagnéticas con una polarización específicas son (radiadas) reflejadas en todas las direcciones de un blanco, estas ondas son divididas en dos partes. La primera parte está compuesta por señales que tienen la misma polarización que recibe la antena, la otra parte de la antena tiene diferente polarización en la cual la antena no responde.

La intensidad de energía irradiada tiene la misma polarización que recibe la antena del radar. Cuando un blanco es iluminado por energía RF es como si fuese una antena y se creará campos magnéticos lejanos y cercanos, las ondas reflejadas y medidas en el campo cercano es generalmente esférico y en campos lejanos las formas de onda son descompuestas en combinaciones lineales de ondas planas.

La cantidad "back scattered" de un blanco, es proporcional al porcentaje del tamaño de un blanco con relación al ancho de onda  $\lambda$ , de las ondas incidentes, por lo tanto un radar no estará en capacidad de detectar blancos muy pequeños con ancho de onda muy ancho.

Por ejemplo si los radares climatológicos usan la frecuencia en la banda L, las gotas de lluvia serán casi invisibles al radar, debido a que son mas pequeños que el ancho de la onda. RCS es medido en la región de frecuencia donde el área del blanco y el ancho de onda son comparables.

El análisis presentado en el presente trabajo se lo realiza a objetos o blancos detectados por el radar con áreas pequeñas en el orden de 1 a 4 metros cuadrados y se emplea señales de un ancho de banda típica entre los 10 a 50 metros cuadrados.



**Figura 3.15** Objeto iluminado por el lóbulo del radar a un rango R

Los blancos móviles o fijos que detecta un radar son reflejados al receptor y luego presentados en la pantalla de radar, con mayor o menor intensidad dependiendo del área de refracción que tenga un objeto, como por ejemplo, una aeronave de transporte reflejará una gran área lo cual será fácil de detectar, no así una aeronave de guerra como un avión Mirage que su área de refracción será mucho menor a la anterior, representando mayor dificultad en la detección. Cada uno de los objetos tiene su propia área de refracción la cual puede ser calculada utilizando el programa MATLAB y para esto se ha tomado varias formas geométricas típicas que pueden reflejar como esferas, elipsoides, planas circulares etc.

Tomando en cuenta que la forma de una aeronave en ciertas partes de su estructura es elipsoidal, se calcula el RCS Radar Cross Section de una elipsoide:

Partiendo de la fórmula matemática de una elipsoide se tiene lo siguiente:

$$\sigma = \frac{\pi b^4 c^2}{(a^2 (\text{sen } \theta)^2 + c^2 (\text{cos } \theta)^2)^2}$$

Ec. 11

Si  $a = b = c$

$\Theta = 90^\circ$

$$\sigma = \pi c^2 \quad \text{Correspondiente a la esfera} \quad \text{Ec.}$$

12

Utilizando la función “rsc\_ellipsoid.m” se calcula y grafica el RCS de una elipsoide versus el ángulo que es reflejado por la onda del radar.

**TABLA 3.4 Programa para producir la gráfica y datos de cálculo del rcs elipsoidal**

**function [rsc\_db] = rcs\_ellipsoid (a, b, c, phi)**

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ESTADO
A	Radio a de la elipsoide	m	Entrada
B	Radio b de la ilipsoide	m	Entrada
C	Radio c de la elipsoide	m	Entrada
Phi	Ángulo	grados	Entrada
Rcs	Arreglo de rcs versus el ángulo	dBsm	Salida



*% Este programa calcula la sombra de un RCS de una elipsoide.  
 % El ángulo phi es fijo, mientras el ángulo theta puede variar desde 0-  
 180 grados.  
 % Una gráfica de RCS es generada versus el ángulo theta.*

```

eps = 0.00001;
%Ingresar el tamaño de la elipsoide
a = .15; % 15 cm
b = .20; % 20 cm
c = .95 ; % 95 cm
% Enter angle phi
phi = 45;
% phi = pi / 4.;
sin_phi_s = sin(phi)^2;
cos_phi_s = cos(phi)^2;
% Generar el aspecto del ángulo vector

theta = 0.:05:180;
theta = (theta .* pi) ./ 180.;
if(a ~= b & a ~= c)
    rcs = (pi * a^2 * b^2 * c^2) ./ (a^2 * cos_phi_s .* (sin(theta).^2) + ...
    b^2 * sin_phi_s .* (sin(theta).^2) + ...
    c^2 .* (cos(theta).^2)).^2 ;
else
    if(a == b & a ~= c)
        rcs = (pi * b^4 * c^2) ./ ( b^2 .* (sin(theta).^2) + ...
        c^2 .* (cos(theta).^2)).^2 ;
    else
        if (a == b & a ==c)
            rcs = pi * c^2;
        end
    end
end

```

```

rsc_db = 10.0 * log10(rcs);
figure (1);
plot((theta * 180 / pi),rsc_db);
xlabel ('Aspecto de ángulo - grados');
ylabel ('RCS - dBsm');
%Titulo ('phi = 45 deg, (a,b,c) = (.15,.20,.95) metros')
grid;
return

```

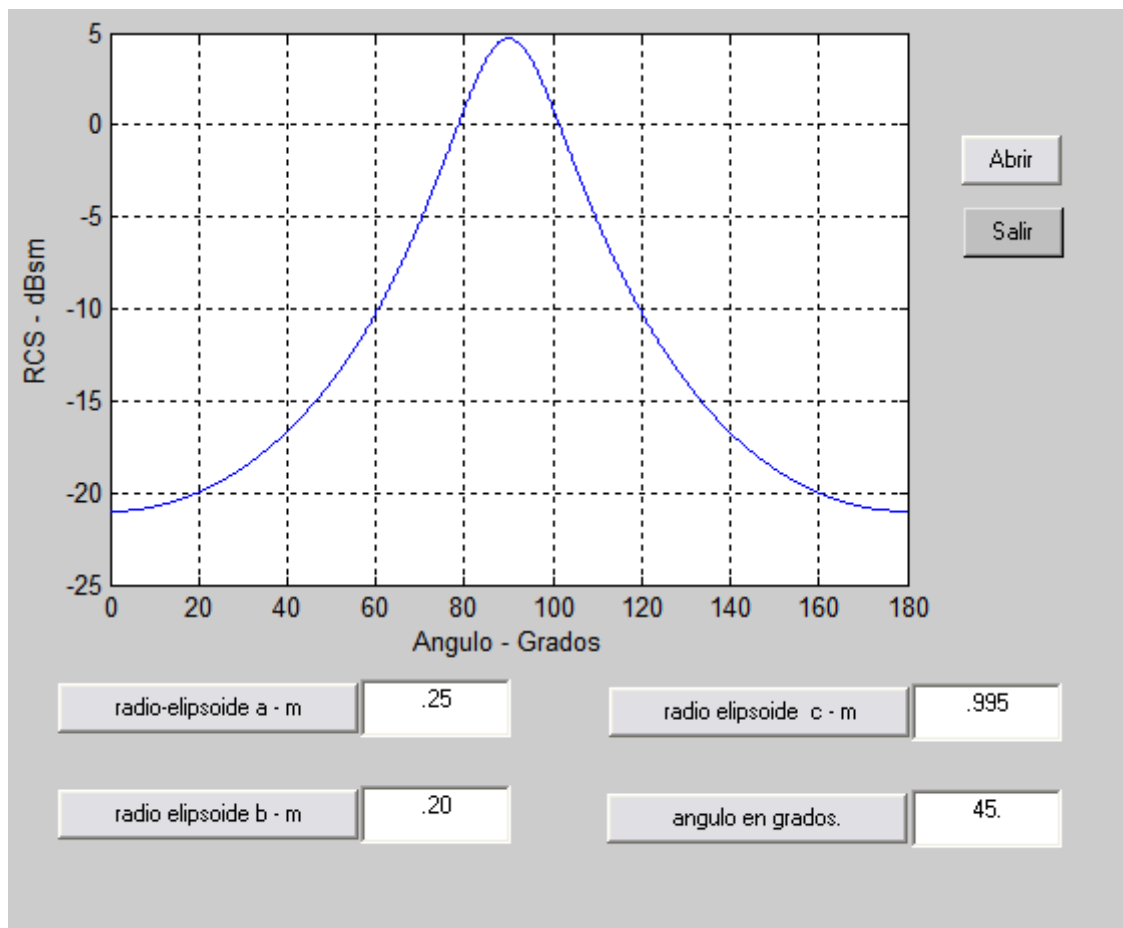


Figura 3.16 Gráfica producida con los datos ingresados en el programa.

## **DATOS DEL CÁLCULO DEL RCS ELIPSOIDAL**

Columns 3569 through 3576

-25.0340 -25.0344 -25.0348 -25.0352 -25.0356 -25.0359 -25.0363  
-25.0366

Columns 3577 through 3584

-25.0369 -25.0372 -25.0375 -25.0377 -25.0380 -25.0383 -25.0385  
-25.0387

Columns 3585 through 3592

-25.0389 -25.0391 -25.0393 -25.0395 -25.0396 -25.0398 -25.0399  
-25.0400

Columns 3593 through 3600

-25.0401 -25.0402 -25.0403 -25.0404 -25.0404 -25.0405 -25.0405  
-25.0405

Column 3601

-25.0405

## **CÁLCULO DE UNA ÁREA PLANA RECTANGULAR**

La ecuación 3.13 es la expresión matemática válida para el cálculo de las curvas del RCS de una figura rectangular plana

$$\sigma = \frac{4\pi a^{2b^2}}{\lambda^2} \left[ \frac{\text{sen}(a \text{ksen}\theta \cos\phi) \text{sen}(b \text{ksen}\theta \text{sen}\phi)^2}{a \text{ksen}\theta \cos\phi \quad b \text{ksen}\theta \text{sen}\phi} \right] (\cos\theta)^2 \quad \text{Ec.}$$

3.13

```
function [rcsdb_h,rcsdb_v] = rcs_rect_plate(a, b, freq)
%Este programa calcula la sombra del RCS de un cuerpo rectangular
% Plato plano. El RCS es calculado por la polarización vertical y
horizontal
% basado en la ( Ec. 3.13).también físico
%El usuario puede variar la frecuencia, ó las dimensiones del plato.
% Los valores establecidos son a=b=10.16cm; lambda=3.25cm.
eps = 0.000001;
% Ingrese a, b, y lambda
lambda = .0325;
ka = 2. * pi * a / lambda;
% Calcule el vector del ángulo
theta_deg = 0.05:0.1:85;
theta = (pi/180.) .* theta_deg;
sigma1v = cos(ka .* sin(theta)) - i .* sin(ka .* sin(theta)) ./ sin(theta);
sigma2v = exp(i * ka - (pi /4)) / (sqrt(2 * pi) *(ka)^1.5);
sigma3v = (1. + sin(theta)) .* exp(-i * ka .* sin(theta)) ./ ...
(1. - sin(theta)).^2;
sigma4v = (1. - sin(theta)) .* exp(i * ka .* sin(theta)) ./ ...
(1. + sin(theta)).^2;
sigma5v = 1. - (exp(i * 2. * ka - (pi / 2)) / (8. * pi * (ka)^3));
sigma1h = cos(ka .* sin(theta)) + i .* sin(ka .* sin(theta)) ./ sin(theta);
sigma2h = 4. * exp(i * ka * (pi / 4.)) / (sqrt(2 * pi * ka));
sigma3h = exp(-i * ka .* sin(theta)) ./ (1. - sin(theta));
sigma4h = exp(i * ka * sin(theta)) ./ (1. + sin(theta));
sigma5h = 1. - (exp(j * 2. * ka + (pi / 4.)) / 2. * pi * ka);
% Calcula la polarizacion vertical del RCS
rcs_v = (b^2 / pi) .* (abs(sigma1v - sigma2v .*((1. ./ cos(theta)) ...
```

```

+ .25 .* sigma2v .* (sigma3v + sigma4v) .* (sigma5v).^-1).^2 + eps;
% calcula la polarización horizontal del RCS
rcs_h = (b^2 / pi) .* (abs(sigma1h - sigma2h .* ((1 ./ cos(theta)) ...
- .25 .* sigma2h .* (sigma3h + sigma4h)) .* (sigma5h).^-1)).^2 + eps;

% Cálculo de RCS desde la óptica física, Eq.( ( Ec. 3.13))
angle = ka .* sin(theta);
rcs_po = (4. * pi* a^2 * b^2 / lambda^2) .* (cos(theta)).^2 .* ...
((sin(angle) ./ angle).^2) + eps;
rcsdb_v = 10. .*log10(rcs_v);

rcsdb_h = 10. .*log10(rcs_h);
rcsdb_po = 10. .*log10(rcs_po);

figure(2)
plot(theta_deg, rcsdb_v,'k',theta_deg,rcsdb_po,'k -');
set(gca,'xtick',[10:10:85]);
freqGH = num2str(freq*1.e-9);
A = num2str(a);
B = num2str(b);
title(['Polarización vertical, ','Frecuencia =',[freqGH],' GHz, ',' a = ',
[A], ' m',' b =',[B], ' m']);
ylabel('RCS -dBsm');
xlabel('Aspecto del ángulo -grados');
legend('Eq.(3.13)',

figure(3)
plot(theta_deg, rcsdb_h,'k',theta_deg,rcsdb_po,'k -');
set(gca,'xtick',[10:10:85]);
title(['Polarización horizontal, ','Frecuencia',[freqGH],' GHz, ',' a = ',
[A], ' m',' b =',[B], ' m']);
ylabel('RCS -dBsm');
xlabel('Aspecto del ángulo - Grados');

```

legend('Ec.(3.13)')

The image shows a graphical user interface with a grey background. At the top, there are two buttons: 'Abrir' on the left and 'Salir' on the right. Below these, there are three input fields. The first is labeled 'Lado corto: a - m' and is empty. The second is labeled 'lado largo: b - m' and is empty. The third is labeled 'frecuencia - Hz' and is empty.

Figura 3.17 Interfase gráfica para ingresar los datos de Ec. 3.13 para el programa del RCS plano rectangular

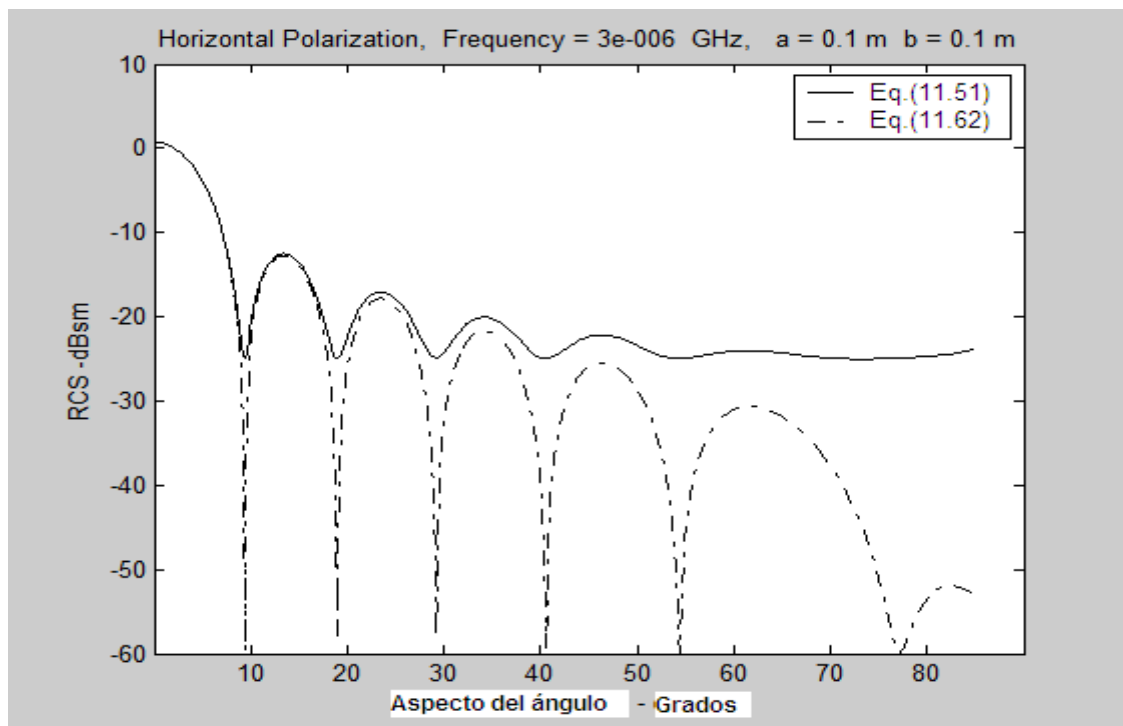


Figura 3.18 Gráfica producida de la Ec. 3.13 del RCS plana rectangular

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 CONCLUSIONES**

**4.1.1** Luego de haber concluido con el desarrollo del presente proyecto se puede indicar que se ha cumplido con el objetivo impuesto por la ESPE\_L. Como un requisito indispensable para obtener el título de Ingeniero Electrónico de Instrumentación en la carrera de Electrónica

**4.1.2** Ante esta realidad y luego de haber trabajado por mas de 20 años en lo que comprende en el área técnica de Mantenimiento de Radares, he creído conveniente aplicar todos los conocimientos adquiridos en la Escuela Politécnica del Ejército en esta temática muy importante utilizando las nuevas herramientas computacionales y de software aplicándolas en la simulación del diseño de los parámetros del Radar para calcular y graficar funciones que ya están establecidas en el programa MATLAB, de la cual se sirve para poner en práctica la teoría del Radar.

**4.1.3** Comprende en el área técnica de Mantenimiento de Radares, he creído conveniente aplicar todos los conocimientos adquiridos en la Escuela Politécnica del Ejército en esta temática muy importante utilizando las nuevas herramientas computacionales y de software aplicándolas en la simulación del diseño de los parámetros del Radar para calcular y graficar funciones que ya están establecidas en el programa MATLAB, de la cual se sirve para poner en práctica la teoría del Radar.

**4.1.4** Ante la importancia que representa para un país en la actualidad contar con un sistema integrado de vigilancia de alerta y control del espacio aéreo, el mismo que es parte constitutiva del Estado y que debe ser custodiado y protegido para que ninguna aeronave extraña pueda violar el espacio Aéreo que es parte del territorio Nacional.

**4.1.5** Para precautelar la seguridad Nacional del espacio aéreo, todos los países han implementado los sistemas radáricos, los cuales están constituidos en redes de vigilancia, sistemas que fueron probados en la II Guerra Mundial, que cumplieron un papel preponderante y definitorio en la consecución de la victoria ante la Alemania Nazi por parte del país inventor de estos Sistemas como lo es Inglaterra.

**4.1.6** La simulación de los parámetros de un radar es esencial para contar con un diseño exitoso de un sistema de un Radar moderno, es por esta razón que utilizará para este propósito el programa MATLAB, que es de inigualable calidad, debido a que tiene la capacidad de adaptarse a la necesidad en los cálculos y graficaciones, con el cual podemos obtener lo siguiente:

- Entender el diseño físico y operativo de un Radar.
- Conocer cuales son los requerimientos que deben reunir los parámetros para el diseño de un Radar.
- Estar en condiciones de analizar el rendimiento de cada uno de los equipos electrónicos que componen un sistema radárico.

**4.1.7** Con la simulación se puede realizar los efectos que producen en la operación del Radar cada uno de los siguientes parámetros:

- La frecuencia del Radar.
- El PRF ( Pulse, Repetition Frecuency )
- Ancho de pulso.



- Frecuencia de Transmisión.
- El RCS ( Radar Cross, Selection )
- Arreglos de antenas
- Resolución del rango

**4.1.8** El programa MATLAB ha permitido profundizar en el análisis de los parámetros del radar con el cual se ha obtenido lo siguiente:

- Enfatizar en el proceso de diseño mientras se provee de conocimientos teóricos que se necesita para analizar los sistemas radáricos.
- Presenta la comprensión y la experta cobertura especializada de tópicos como la visualización de los lóbulos de radiación que se puede obtener como el diseño de arreglo de antenas, procesamiento de señales.
- Los programas implementados permiten realizar cálculos y graficar funciones que en la practica del diseño son muy utilizadas .
- El programa ofrece una completa fuente de funciones para realizar todo tipo de cálculos.

**4.1.9** El radar es un sistema electrónico que esta compuesto por varios equipos en los que se puede encontrar toda clase de circuitos electrónicos, desde un amplificador de RF, hasta un complejo sistema de procesamiento de señales digitales, en donde los fabricantes han puesto lo mejor de la tecnología de punta para hacer de estos sistemas lo mas versátiles especialmente en el ámbito militar.

**4.1.10** El Proyecto es el resultado de la investigación de varias informaciones que se encuentra en idioma Inglés la cual ha sido traducida completamente y adaptada al requerimiento para alcanzar el desarrollo de la tesis, a fin de que sea comprensible y de fácil uso.

**4.1.11** La temática en la que se refiere al análisis de los parámetros del radar es muy compleja y extensa, razón por la cual se ha escogido los parámetros más importantes y decisivos para comprender la teoría del radar y su funcionamiento.

**4.1.12** Todo Sistema radarico es afectado en su rendimiento o en sus parámetros por factores externos e internos como los atmosféricos o en el procedimiento de las señales respectivamente, factores que son importantes a la hora del diseño de un radar para que la simulación sea lo más real posible, como es en el caso en la implementación del programa para calcular la ecuación del radar, en este programa se incluye las perdidas de un porcentaje que puede ser impuesto por el diseñador dependiendo de los factores que rodean al radar, también en la ecuación del radar intervienen factores o parámetros que influyen en el alcance del mismo y en la detección de las aeronaves.

**4.1.13** Otros de los programas implementados es la ecuación del radar analizado desde el punto de vista de la frecuencia de repeticiones de pulsos (PRF), el cual permite realizar los cálculos del alcance del radar en función del LOW PRF y relación de señal ruido SNR, con este cálculo se obtiene la grafica entre el rango del radar y la relación señal ruido, para este programa se utiliza la función "lprf\_req.m".

**4.1.14** También se implemento el programa con el cual permite calcular la resolución del rango el cual es un  $\Delta R$  que es la variación del rango entre dos aeronaves que mientras más pequeña sea la distancia de las mismas mejor será la habilidad del radar para ser detectadas por el mismo.

La función utilizada para el programa “range\_irsolution.m”, en el cual intervienen el ancho de banda y el ancho de pulso que son parámetros de entrada y la resolución de rango y el resultante de este programa.

**4.1.15** Uno de los parámetros importantes para el diseño de radares es la antena del mismo el cual está constituido por varios factores que permitirá obtener una buena ganancia y por ende una formación del lóbulo de radiación que permita obtener la mejor detección de las aeronaves.

Para esto es necesario diseñar el mejor arreglo de antenas en el cual se obtendrá los lóbulos laterales más pequeños y el lóbulo principal con la ganancia y la forma adecuada; para este programa se utiliza la función de acuerdo al tipo de arreglo que se vaya implementar, entre los cuales se ha implementado las siguientes funciones:

“linear\_arr.m”

“circular\_arr.m”

“rect\_arr.m”

Para el mejor uso de estos arreglos se implemento una interfase gráfica que permita seleccionar los arreglos de acuerdo a la necesidad del usuario GUI, facilidad que permite el programa MATLAB para optimizar su uso.

**4.1.16** Este Proyecto es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el proceso de aprendizaje en la Carrera de Ingeniería Electrónica e Instrumentación y la investigación profunda realizada en un tema muy extenso y complejo como es los Sistemas Radáricos, proyecto que permitirá obtener el título de Ingeniero Electrónico para graduarme en esta honorable Institución como es la ESPEL.

**4.1.17** Debido a lo extenso, complejo y nuevo que resulta esta temática en el ámbito Universitario, existe limitaciones porque no se puede abarcar todos los factores y parámetros que influyen en el diseño del Radar, sin embargo se ha analizado e implementado los parámetros más importantes para que sean lo más comprensibles.

## **4.2 RECOMENDACIONES.**

**4.2.1** Ampliar la información referente a esta temática, a fin de continuar actualizando la mencionada información.

**4.2.2** Que la ESPEL siga impulsando este tipo de trabajos que van a permitir a los alumnos mejorar sus conocimientos.

**4.2.3** Rapara uso de los programas se debe tener los conocimientos básicos del programa MATLAB, a fin de facilitar su uso.

**4.2.4** Ampliar los conocimientos de la teoría del Radar para entender mejor el funcionamiento de los sistemas Radáricos.

**4.2.5** Entregar una copia del documento al Comando General de la Fuerza Aérea para que sea un documento de consulta para el Comando de la Defensa Aérea.

**4.2.6** Incentivar al alumnado de la ESPE-L para que desarrolle proyectos de este tipo, a fin de elevar el nivel de análisis e investigación.

## ABREVIATURAS

PRF = Frecuencia de repetición de los pulsos  
PPS = Pulsos por segundo  
VSWR = Relación de ondas estacionarias de voltaje  
Tr = Transmisión / Recepción  
RF = Radio Frecuencia  
LO = Oscilador local  
IF = Frecuencia Intermedia  
MTI = Indicador de blancos en movimiento  
PRI = Pulso de repetición  
GCF = Ground clutter filter  
PSD = Detector de Fase sensitivo  
NM = Millas Náuticas  
Kts = Nudos  
ACP = Pulso de control automático  
ARP = Pulso Automático de reseteo  
IFF = Identificador de amigo enemigo  
SSR = Radar secundario de vigilancia  
QNH = Nivel de referencia de la presión barométrica  
CFAR = Control de falsa alarma  
CW = Onda continua  
LOW PRF = Baja Frecuencia de repetición de pulsos  
Ae = Apertura efectiva de la antena  
 $\Lambda$  = longitud de la onda de transmisión  
FAR FIELD = Región de campo lejano  
GRID = Grilla  
r = Radio  
UV = Espacio visible