

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**DISEÑO DE UN RADAR DOPPLER DE ONDA
CONTINUA PARA LA OBSERVACION
OCEANOGRAFICA**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

JORGE CALDERON OVANDO

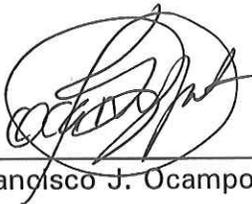
ENSENADA, B. C., NOVIEMBRE DEL 2000.

TESIS DEFENDIDA POR
JORGE CALDERÓN OVANDO
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. J. Apolinar Reynoso Hernández

Director del Comité



Dr. Francisco J. Ocampo Torres

Miembro del Comité



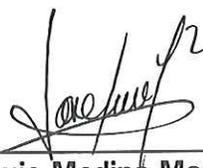
Dr. Eugenio Méndez Méndez

Miembro del Comité



M.C. Benjamín Ramírez Durán

Miembro del Comité



José Luis Medina Monroy

*Jefe del Departamento de
Electrónica y Telecomunicaciones*



Dr. Federico Graef Ziehl

Director de Estudios de Posgrado

30 de Noviembre del 2000

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA.



DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DISEÑO DE UN RADAR DOPPLER DE ONDA CONTINUA
PARA LA OBSERVACIÓN OCEANOGRÁFICA

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

JORGE CALDERÓN OVANDO

Ensenada, Baja California, México, Noviembre 2000

RESUMEN de la Tesis de Jorge Calderón Ovando presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, México. Octubre del 2000.

DISEÑO DE UN RADAR DOPPLER DE ONDA CONTINUA PARA LA OBSERVACIÓN OCEANOGRÁFICA

Resumen aprobado por:



Dr. J. Apolinar Reynoso Hernández
Director de Tesis

A partir del estudio teórico de los diferentes parámetros que relacionan las ondas electromagnéticas y la superficie del mar, este trabajo de tesis presenta una metodología sistemática para el diseño de un Radär Doppler de onda continua, dirigido a la observación oceanográfica en la zona costera. Se presenta un estudio de los diferentes tipos de radares, sus configuraciones, componentes y características propias.

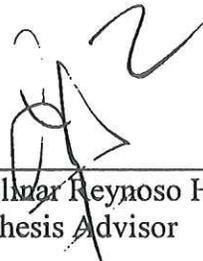
Se propone un sistema completo de un Radar Doppler de onda continua. Este está encaminado a su realización y construcción física, por lo que a partir de un estudio teórico se indican todos los pasos y requerimientos necesarios. Estos incluyen, el diagrama del sistema, la descripción del funcionamiento del mismo, los parámetros de entrada y salida para cada componente utilizado además, de su marca y modelo disponible en el mercado actual. Finalmente se presenta un análisis sobre el comportamiento que tendrá el radar propuesto sobre la superficie del mar. Así como los parámetros que pueden ser variados en el sistema y su consecuente respuesta.

Palabras claves: Efecto Doppler, Radar de onda continua, observación oceanográfica.

ABSTRACT of the thesis presented **Jorge Calderón Ovando**, in order to obtain the **MASTER of SCIENCE DEGREE in TELECOMMUNICATIONS AND ELECTRONICS**. Ensenada, Baja California, México. October 2000.

CONTINUOUS WAVE DOPPLER RADAR DESING FOR THE OCEANOGRAPHIC OBSERVATION.

Approved by:



Dr. J. Apolmar Reynoso Hernández
Thesis Advisor

From the theoretical study of the different parameters relating the electromagnetic waves and the surface of the sea, this dissertation presents a systematic methodology for the design of a continuous wave Doppler Radar, used for oceanographic observation in the coastal zone. An analysis of the Doppler effect and the modulated frequency is presented. Furthermore a description of the different types of radars, is also discussed.

A complete system of a continuous wave Doppler Radar is proposed. The radar description include, the diagram of the system, the description of the operation, the input and output parameters for each component used as well as its mark and model available in the present market. Finally, an analysis about of the radar behavior is presented.

Keywords: Doppler effect, continuous wave radar, oceanographic observation.

DIDICATORIA

Al amor de mi vida Aline.

A mis padres Jorge y Azucena.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia Jorge, Azucena y Brenda por su apoyo incondicional su cariño y la confianza que depositaron en mi durante todos mis estudios.

Para Aline que gracias a su amor, comprensión y apoyo logre salir adelante en esta etapa decisiva en mi vida profesional.

Al Dr. J Apolinar Reynoso, que bajo su dirección me brindo uno de los más grandes tesoros su conocimiento y experiencia.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Francisco Ocampo, Dr. Eugenio Méndez y M.C. Benjamín Ramírez, por sus comentarios y aportaciones invaluable en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros Susana Padilla, Raúl Infante, Alberto Ramírez, Raúl Loo y Jaime Camacho por su amistad, consejos y ayuda.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior (CICESE) por la formación y educación que me brindo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

CONTENIDO

I	INTRODUCCIÓN	1
I.1	Orígenes del problema.....	2
I.2	Objetivos y metas	5
I.3	Historia e inicios del Radar	7
II	LAS CARACTERÍSTICAS DEL RADAR Y LA SUPERFICIE DEL MAR.	9
II.1	Introducción.....	9
II.2	El efecto Doppler	10
II.3	Frecuencia modulada.	14
II.4	Ecuaciones y parámetros del Radar.	17
II.5	Los parámetros del Radar y la superficie del mar	24
II.5.1	Clutter	32
II.5.2	Polarización	33
III	SISTEMAS Y CONFIGURACIONES.	35
III.1	Tipos fundamentales de Radares.	35
III.1.1	Radar pulsado.	36
III.1.2	Radar Doppler de onda continua.	39
III.1.3	Radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada.	42
IV	DISEÑO DEL SISTEMA DE RADAR.	48
IV.1	Introducción.....	48

IV.2 Elección	49
IV.3 Configuración	56
IV.3.1 Transmisor.....	56
IV.3.2 Receptor.....	57
IV.3.3 Sistema completo.....	59
IV.3.4 Módulo de procesamiento de la señal.....	60
IV.4 Variables de diseño.....	63
IV.5 Componentes.....	68
IV.5.1 <i>Osciladores</i>	71
IV.5.2 <i>Mezcladores</i>	75
IV.5.3 <i>Filtros</i>	79
IV.5.4 <i>Amplificadores</i>	85
IV.5.5 <i>Divisor de potencia</i>	91
IV.5.6 <i>Circulador</i>	95
IV.5.7 <i>Antenas y polarotor</i>	95
IV.5.8 <i>Detectores</i>	96
IV.5.9 <i>Demodulador</i>	97
IV.5.10 <i>Inversor y sumador</i>	98
IV.5.11 <i>Convertidor analogico-digital</i>	99
IV.5.12 <i>Computadora personal</i>	100
IV.6 Calculo de la respuesta esperada.....	101
V Conclusiones	113
V.1 Aportaciones	113

V.2 Recomendaciones.....	114
LITERATURA CITADA	116
ANEXO I. CIRCUITO DEL MODULO DE BAJA FRECUENCIA Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.	118
ANEXO II. PRESUPUESTO TOTAL DEL SISTEMA.	123
ANEXO III. PROGRAMAS EN MATLAB PARA LA REALIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS PRESENTADOS.....	124

FIGURA	LISTA DE FIGURAS	PAGINA
1	Ilustración de la aparente compresión y descompresión de las ondas electromagnéticas a causa del efecto Doppler.	14
2	Frecuencia modulada generada por un oscilador y un circuito LC variable.	15
3	Relación de la desviación en frecuencia de la portadora de FM con la amplitud de la señal modulada.	16
4	Relación gráfica entre el índice de modulación y el ancho de banda de la señal portadora.	17
5	Patrón de radiación de una antena isotrópica.	19
6	Iluminación de una antena directiva en comparación con una antena isotrópica.	21
7	<i>Radar cross section</i> para un blanco y una esfera perfecta con un área de un metro cuadrado.	22
8	<i>Radar cross section</i> de una esfera y un plano.	23
9	Reflexión especular en la superficie del mar.	25
10	Reflexión difusa en la superficie del mar.	26
11	Datos a considerar en el cálculo básico de la dinámica en la superficie del mar.	27
12	Relación entre la velocidad de fase del oleaje, su longitud de onda y la profundidad.	28
13	Relación entre la frecuencia Doppler generada, la velocidad de las olas y la frecuencia de transmisión del radar. .	29
14	Comportamiento que tienen las olas de menor amplitud sobre las de mayor amplitud, y el tipo de respuesta en función de la velocidad para un instante de tiempo.	31
15	Dirección de propagación de una onda electromagnética en relación a la posición de un conductor.	34
16	Diagrama a bloques básico de un radar pulsado.	37
17	Esquema básico de un radar de onda continua.	40
18	Incremento lineal en la frecuencia transmitida y su diferencia con respecto a la frecuencia recibida después de un tiempo τ	42

FIGURA	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	PAGINA
19	Señal transmitida y recibida después de un cierto tiempo τ , cuando se utiliza una modulación en frecuencia a partir de una forma de onda periódica.	44
20	Frecuencia resultante de la diferencia entre la frecuencia transmitida y la frecuencia recibida.	45
21	Diagrama básico de un radar de onda continua Doppler y frecuencia modulada.	46
22	Diagrama a bloques, del sistema de radar de onda continua interrumpida modulado en frecuencia, utilizando un circulador.	47
23	Diagrama a bloques del radar propuesto del tipo Doppler de onda continua y frecuencia modulada.....	50
24	Diagrama a bloques de la etapa del transmisor para el radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada propuesto.	51
25	Diagrama a bloques de la etapa del receptor para el radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada propuesto.	53
26	Factor de error, cuando se utiliza la modulación en frecuencia y se tienen blancos en movimiento.....	55
27	Diagrama a bloques de la etapa de transmisión, para el diseño final del radar Doppler de onda continua.	56
28	Diagrama a bloques de la etapa de recepción, para el diseño final del radar Doppler de onda continua.	58
29	Diseño a bloques del Radar Doppler de onda continúa propuesto.	60
30	Módulo de procesamiento de la señal para el radar Doppler de onda continua.....	62
31	Parámetros de diseño físico en un paraboloide de revolución. ..	64
32	Relación de la ganancia, el diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión de la misma.....	67
33	Ángulos horizontal y vertical en el haz de iluminación de la antena directiva.	68
34	Relación del ángulo horizontal del haz de iluminación con el diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión.....	69
35	Relación del ángulo vertical del haz de iluminación con el diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión.....	70

FIGURA	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	PAGINA
36	Relación entre el área de iluminación sobre la superficie del mar, la distancia al blanco y la frecuencia de transmisión del radar.	71
37	Nomenclatura en el espectro de frecuencias.	72
38	Uso general establecido para el espectro de microondas.....	73
39	Parámetros de salida en la señal del oscilador de baja frecuencia.	75
40	Parámetros de salida en la señal del oscilador de alta frecuencia.	76
41	Etapa del mezclador <i>Up-Converter</i> y sus parámetros de entrada y salida.....	78
42	Parámetros de entrada y salida para el mezclador <i>Down-Converter</i>	79
43	Parámetros de entrada y salida del filtro pasabanda en la etapa del transmisor del sistema de radar.....	80
44	En esta se muestran los parámetros de entrada y salida para el filtro de alta frecuencia en la etapa de recepción del sistema de radar.	81
45	Entrada y salida, para el filtro de baja frecuencia en la etapa de recepción del sistema de radar.	82
46	Parámetros de entrada y salida del amplificador de baja frecuencia.	83
47	Nivel de potencia a la salida y frecuencia del amplificador de alta frecuencia en la etapa del transmisor para el sistema de radar.....	84
48	Niveles del amplificador de bajo ruido a la entrada del sistema de recepción del sistema de radar.....	85
49	Parámetros del amplificador intermedio de baja potencia, en la etapa de recepción del sistema de radar.....	86
50	Configuración y parámetros de entrada y salida del divisor de potencia para la señal de baja frecuencia.	87
51	Parámetros de entrada y salida para el divisor de potencia conectado al oscilador de alta frecuencia.	88
52	Configuración y parámetros del divisor de potencia utilizado en la etapa de recepción del sistema de radar.	89

FIGURA	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	PAGINA
53	Niveles de entrada y salida, del circulador utilizado en la etapa del transmisor del sistema de radar.	90
54	Parámetros de transmisión y recepción para el par de antenas utilizadas en el sistema de radar.	91
55	Diagrama de los parámetros de entrada y salida para el detector en la etapa del procesamiento de la señal.	92
56	Parámetros del demodulador utilizado para la señal proveniente del oscilador de baja frecuencia.	93
57	Parámetros del demodulador utilizado para la señal proveniente del receptor.	94
58	Diagrama a bloques y parámetros de entrada y salida del dispositivo inversor.	95
59	Diagrama a bloques y parámetros del dispositivo que realiza la diferencia de los voltajes de dos señales.	97
60	Parámetros de entrada y salida, en el convertidor analógico digital utilizado para procesar la señal del voltaje Doppler.	98
61	Parámetros de entrada y salida, en el convertidor analógico digital utilizado para procesar la señal del Detector. .	99
62	Diagrama a bloques de los parámetros de entrada para la computadora personal.	100
63	Relación entre la frecuencia Doppler y la velocidad del blanco si se tiene una frecuencia de transmisión de 3.65 GHz.	102
64	Referencia para calcular la distancia del punto donde se localizará el radar, hasta la superficie del mar.	103
65	Relación del área de iluminación del radar en la superficie del mar, con la distancia a la cual se coloque el radar, para una frecuencia de transmisión de 3.65 GHz.	104
66	Relacion geométrica y concentración de energía en el área iluminada por el radar, en relación con la distancia, el ángulo de incidencia y el ángulo vertical y el horizontal del patron de radiación de la antena.	105
67	Relación entre la distancia lineal de la superficie del mar con el foco la antena, el ángulo de incidencia tomándolo en dirección contraria a las manecillas del reloj y el área de iluminación del radar.	106

FIGURA	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	PAGINA
68	Relación de la densidad de potencia, con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 0 a 1000 metros.	107
69	Relación de la densidad de potencia, con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 200 a 1000 metros.	108
70	Relación de la densidad de potencia, con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 500 a 1000 metros.	109
71	Contornos de la densidad de potencia en relación con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 500 a 1000 metros.....	110
72	Relación de pérdidas en dB/km contra la frecuencia en GHz en la atmósfera terrestre al nivel del mar, de tiempo seco y con neblina. [Barton ,1998].....	111

TABLA	LISTA DE TABLAS	PAGINA
I	VALORES TÍPICOS DEL "RADAR CROSS SECTION" PARA DISTINTOS BLANCOS.	20
II	RELACIÓN DE COMPONENTES, PARA EL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RADAR DOPPLER PROPUESTO.	61
III	RELACIÓN DE COMPONENTES, PARA EL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÓDULO DE PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.	63
IV	CLASIFICACIÓN DE OSCILADORES DE MICROONDAS DE ACUEDO AL TIPO DE COMPONENTES ACTIVOS QUE LOS COMPONENTEN.	74

DISEÑO DE UN RADAR DOPPLER DE ONDA CONTÍNUA PARA LA OBSERVACIÓN OCEANOGRÁFICA.

I INTRODUCCIÓN

El nombre de radar como es concebido es referente a un dispositivo el cual puede detectar la presencia de un objeto y su distancia, radar es la contracción de las palabras *radio detection and ranging*; ya que el propósito primordial para el que fue concebido este dispositivo era para localizar aviones hostiles durante la Segunda Guerra Mundial y así poder direccionar las armas antiaéreas. Actualmente, los radares son capaces de detectar muchos más parámetros. Sin embargo el poder medir la distancia sigue siendo una de sus principales cualidades, ya que no existe ningún otro dispositivo que sea capaz de medir con tanta velocidad la distancia de un objeto.

El radar, básicamente, es un sistema basado en la emisión de ondas electromagnéticas para la detección y localización de objetos. Opera transmitiendo una forma particular de onda y detectando la naturaleza del eco de la señal recibida. Un radar es usado para ampliar la capacidad de "visión" que tenemos del entorno o medio ambiente. El valor que puede tener un radar no es precisamente el de sustituir al ojo humano, por ejemplo, ya que el radar por si solo no puede reconocer colores o especificar con detalle las formas, como lo podría hacer el ojo humano u otro dispositivo electrónico. Sin embargo, el radar tiene la capacidad de "ver" en condiciones muy adversas y detectar blancos muy lejanos, así como medir su distancia y su velocidad, siendo estos sus mayores atributos.

En forma elemental un radar consiste de una antena transmisora que emite radiación electromagnética generada por un oscilador, una antena receptora y un dispositivo que sea capaz de detectar la energía recibida. Parte de la energía transmitida es interceptada por un objeto y reflejada en todas direcciones, siendo esta energía la de mayor interés en un radar. La antena receptora del radar, colecta parte de la energía reflejada y la manda a un dispositivo capaz de procesarla y de esta manera poder conocer en primer término la presencia del objeto, así como su distancia y velocidad relativa. Una forma común que utilizan los radares para medir la distancia a la que se encuentra el objeto es mediante mediciones del tiempo en que tarda la señal transmitida en regresar. La dirección o posición angular del objeto puede ser determinada, localizando la dirección en la cual arriba el frente de onda de la señal reflejada. Cuando existe un movimiento relativo, éste puede ser detectado mediante el cambio de frecuencia en la señal reflejada debido a la frecuencia Doppler generada.

I.1 *Orígenes del problema*

El estudio de la superficie del mar, principalmente en las zonas costeras, es un problema de vital importancia, ya que en estas se encuentra una gran cantidad de recursos naturales e inversiones económicas. El poder comprender y predecir el comportamiento de diversos fenómenos oceanográficos y la manera en que influyen en las costas lograría un mejor aprovechamiento y conservación de las mismas.

Lo anterior hace necesario encontrar instrumentos con los cuales podamos realizar mediciones precisas y que nos arrojen el mayor número de datos posibles. El estudio

de la interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie del mar ha probado ser una de las herramientas más útiles para observar la superficie del mar pudiéndose recabar gran cantidad de datos [Poulter *et al.*, 1994]. Esto es debido a que la reflexión de las ondas electromagnéticas y en especial las microondas, depende directamente del estado en que se encuentra la superficie del mar e incluso de las características del fondo, cuando se tienen pocos metros de profundidad.

Para poder estudiar la interacción de ondas electromagnéticas con la superficie del mar, se requiere un sistema, capaz de generar, recolectar y procesar las ondas electromagnéticas. Esto puede hacerse utilizando un radar. El radar es un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos, que opera transmitiendo una forma particular de onda y detectando la naturaleza de la señal reflejada. Es un sistema que cumple con los requerimientos necesarios para lograr la interacción antes mencionada.

En un radar, la forma de la señal recibida y el nivel de potencia dependerá de las condiciones de la superficie del mar. Por ejemplo, en una superficie totalmente tranquila se tendrá una cierta respuesta muy distinta a la obtenida por una superficie muy irregular causada por un oleaje alto; también una composición del agua con una gran cantidad de partículas suspendidas o un derramamiento de petróleo ocasionará una respuesta diferente [McGregor *et al.*, 1998]. Estos son sólo algunos ejemplos de todas las características del mar que pueden ser estudiadas. Otra ventaja que se tiene en la utilización de radares es que, a diferencia de otros sensores remotos, como pueden ser cámaras, los radares pueden trabajar en cualquier condición climática y tienen un

gran campo de visión, lo que hace atractiva su utilización. Ahora bien, existen muchos factores a considerar en el diseño, construcción y utilización de un radar, estos son precisamente algunos de los problemas a resolver.

El radar que se desea implementar en principio, es uno de onda continua tipo Doppler, que basa su funcionamiento en el efecto Doppler; dicho efecto se refiere a los cambios de frecuencia en la radiación electromagnética reflejada por objetos en movimiento. Para usar el efecto Doppler se utiliza una antena que emite ondas electromagnéticas. Durante su viaje, estas ondas pueden ser reflejadas por un cierto objeto en su camino. Después, la antena recibe las ondas que fueron reflejadas y utiliza el cambio en la frecuencia para determinar la velocidad de los objetos. También se puede contemplar el uso de una modulación en frecuencia para poder calcular la distancia a la cual se encuentra el blanco mediante la diferencia en frecuencia modulada transmitida y recibida.

El principio de las investigaciones para abordar este problema en México, da inicio con el proyecto "Las ondas generadas por el viento en la interface Océano-Atmósfera" (CONACYT 3993-T9402), donde se realizaron observaciones de la superficie del mar utilizando un escaterómetro trabajando en la banda C y se realizaron mediciones de oleaje, nivel del mar y viento, en noviembre de 1995. Este proyecto utilizó un escaterómetro construido en el departamento de electrónica y telecomunicaciones del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, un ológrafo y una estación meteorológica del instituto de investigaciones oceanológicas. De los datos obtenidos y procesados se realizó en 1997 un informe técnico " Observaciones de la su-

perficie del mar mediante un radar estático de microondas en banda C. La relación con el viento y el oleaje prevalecientes. Experimento Punta Morro 1995.” publicado por el CICESE. Con los resultados de este proyecto se recabaron datos de la interacción de las ondas electromagnéticas con el mar y los tipos de respuesta que se tienen. Sin embargo, estos datos solo dieron información sobre algunos comportamientos, pero dado que se usó un escaterómetro, no se pudo llegar más lejos; esto debido a que un instrumento de este tipo solo puede recolectar información del nivel de potencia reflejado por la superficie del mar. Por esto surgió la necesidad de avanzar, y construir un radar con las características necesarias para su aplicación en estudios oceanográficos

El radar está encaminado a tener un proyecto nacional, con el que se pueda avanzar en el desarrollo multidisciplinario de la investigación oceanográfica, además que se tenga la capacidad de utilizar al máximo la información generada de los océanos por sensores remotos. Y en el ramo de investigación científica tiene un vínculo directo en el estudio de interacción de las ondas electromagnéticas y la superficie del mar, donde se daría la aplicación directa del radar.

I.2 *Objetivos y metas*

El objetivo del presente trabajo es el diseño de un radar de onda continua del tipo Doppler, considerando la posible implementación de la frecuencia modulada, para utilizarse en estudios de la superficie del mar; se deben tener las bases para conocer los parámetros de un radar, tanto de onda continua como pulsado y poder precisar la con-

veniencia de utilizar el primero de éstos; así mediante una validación teórica poder entender las ventajas de un radar de onda continua tipo Doppler.

Debido a la zona en la cual será utilizado el radar, donde no se tiene áreas delimitadas como es la superficie del mar, impide la utilización de un escaterómetro, ya que sería imposible conocer parámetros como distancia o velocidad siendo estos parte de los objetivos buscados. También se requiere un análisis de las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de componentes que conforman un radar y su elección dependiendo de parámetros elegidos, como por ejemplo la frecuencia o la potencia de operación. Dado el objetivo planteado anteriormente, para este proyecto de tesis a realizar se tienen las siguientes metas:

1. Validar el uso del radar de onda continua de tipo Doppler.
2. Encontrar un diseño de radar de onda continua que sea realizable y contemple el mayor número de beneficios.
3. Justificar las siguientes variables en el diseño:
 - (a) La banda de frecuencias.
 - (b) La opción de un radar Doppler.
 - (c) La polarización
 - (d) Componentes utilizados.
4. Tener la posibilidad a partir del radar diseñado de conocer los siguientes parámetros:

- (a) La composición del espectro en cuanto a potencia reflejada y frecuencia.
- (b) La posibilidad de encontrar distancia a la cual se encuentra el blanco.
- (c) La velocidad relativa del blanco.

I.3 *Historia e inicios del Radar*

El principio del radar lo expuso a fines de 1911 el escritor norteamericano H. Gernsback en su novela ciencia ficción "Ralph 124 ". En 1922, Marconi expuso su base científica, en lo referente al principio de la reflexión de las ondas electromagnéticas por parte de un obstáculo, anticipando los experimentos que se efectuarían en los años treinta. En 1924, E. Appleton estudió la reflexión de impulsos electromagnéticos en el estrato de la ionosfera y poco después, Pierre David localizó por este procedimiento un avión en vuelo. La invención, primero del magnetrón y después del klystron, ambos usados en los radares actuales, abrieron auténticas posibilidades en el futuro del radar. Las investigaciones llevaron a resultados prometedores hasta 1934 y 1935, años en que por una parte el alemán R. Kühnhold y por otra el británico R. Watson Watt ensayaban dispositivos para la localización de aeronaves en vuelo. En el campo naval se estudiaban aparatos similares para evitar colisiones en navegación nocturna o en condiciones meteorológicas adversas, y en 1935 se experimentó un dispositivo de radar a bordo del trasatlántico francés "Normandie" [Barton *et al.*,1998]. Los alemanes montaron su versión en el torpedero G10 en 1936 y en el acorazado de bolsillo "Admiral Graf Spedd" en 1937. Este mismo año los norteamericanos instalaron un radar en el barco caza-

torpedero "Leary", y al año siguiente en el acorazado "New York" . Pero quienes resolvieron auténticamente los problemas del radar primitivo y le dieron nombre fueron los científicos británicos, en los meses que precedieron a la segunda guerra mundial. La serie de estaciones de radar que montaron para detectar los vuelos realizados en el continente, demostraron ser determinantes en la señalización de bombarderos alemanes en toda la guerra. El crucero "Sheffield" usó el primer radar de la armada británica en 1938, pero al inicio de la conflagración mundial muchas unidades similares estaban ya equipadas con él [Skolnik, 1980]. Otros modelos de menor tamaño se acoplaron a los aviones de caza nocturnos y a los aparatos de escolta. En 1944, los norteamericanos pusieron en servicio su primer radar. Después de la segunda guerra mundial el uso del radar se generalizó en el campo naval, aéreo y terrestre, tanto militar como civil y posteriormente junto a la calculadora electrónica, se ha hecho indispensable en el desarrollo espacial.

II LAS CARACTERÍSTICAS DEL RADAR Y LA SUPERFICIE DEL MAR.

II.1 *Introducción*

En esta sección se abordarán los fundamentos para comprender las variables que caracterizan a un radar y que se pueden considerar adecuados para una aplicación como la que se requiere. Dado que cada día, se descubren nuevos diseños de radares con variables propias que son útiles en aplicaciones específicas, no podemos considerar a todas simultáneamente, por dos razones. Una es que gran parte de los parámetros que se contemplan y que pueden obtenerse de un radar mediante el diseño son utilizados en aplicaciones militares y difícilmente pueden ser estudiados libremente, debido a que esta teoría de diseño es celosamente custodiada por los países o las empresas que tienen la posibilidad de desarrollar este tipo de radares. La otra razón es tener en cuenta sólo los diseños con variables que sean posibles obtener a partir de un radar realizable, utilizando componentes que se puedan adquirir en un cierto mercado, apegándose a un limitado presupuesto y además que puedan implementarse con los medios disponibles en un laboratorio de una institución educativa mexicana.

En este capítulo se explican en conceptos físicos, que siguen siendo la base de la mayoría de los radares actuales, con estos se podrá entender que es lo que podemos obtener a partir de un fenómeno físico relacionado con la interacción de las ondas electromagnéticas y la superficie del mar.

II.2 *El efecto Doppler*

El corrimiento Doppler se puede definir como "el cambio efectivo en la frecuencia de una señal debido a la velocidad relativa del transmisor con respecto al receptor". En un radar éste se manifiesta como un cambio en la frecuencia de la portadora con respecto a la frecuencia de la señal recibida, al ser ésta reflejada por un blanco en movimiento [Barton *et al.*,1998].

Antes de considerar la utilización de este efecto físico en nuestro provecho, debemos dar un marco teórico para entenderlo.

Si se tiene una señal de voltaje transmitida, la cuál tiene la siguiente expresión:

$$v_T(t) = \text{sen}(2\pi f_T t + \phi_0), \quad (1)$$

donde ϕ_0 es la fase en $t = 0$ y f_T la frecuencia transmitida.

Un objeto en movimiento, el cual tiene un distancia entre el blanco y el radar dada por:

$$R(t) = R_0 + \frac{dR(t)}{dt}t, \quad (2)$$

donde R_0 es la distancia en $t = 0$. Además se considera que la tanto la aceleración como las derivadas de orden superior son iguales a cero. La ecuación de voltaje de la señal recibida después de un tiempo τ segundos por el radar, sin tomar en cuenta la atenuación, se define como:

$$v_R(t) = v_T(t - \tau). \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (1) se tiene:

$$v_R(t) = \text{sen}[2\pi f_T(t - \tau) + \phi_0]. \quad (4)$$

Dado que $R(t)$ es la distancia entre el radar y el blanco en un cierto tiempo, y que el número total de longitudes de onda λ_T contenidos entre el radar y el blanco, tomando una ida y una vuelta, se calcula con la expresión siguiente:

$$\lambda_T = \frac{2R(t)}{\lambda}. \quad (5)$$

Además se sabe que la excursión de 2π radianes corresponde a una longitud de onda λ . De esta manera, el total de la excursión angular ϕ_T hecha por la señal es:

$$\phi_T = \frac{4\pi R(t)}{\lambda}. \quad (6)$$

Sabiendo que la fase es igual a la frecuencia angular por el tiempo

$$\phi_T = \omega \cdot \tau(t), \quad (7)$$

y sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (6) tenemos que la fase ϕ_T se define como

$$\phi_T = \omega \cdot \tau(t) = \frac{4\pi R(t)}{\lambda}. \quad (8)$$

Ahora, resolviendo para $\tau(t)$ de la ecuación (8) se tiene

$$\tau(t) = \frac{4\pi R(t)}{\lambda \cdot \omega}. \quad (9)$$

Desarrollando la ecuación (9) tenemos que $\tau(t)$ es

$$\tau(t) = \frac{4\pi R(t)}{\lambda \cdot \omega} = \frac{4\pi R(t)}{\frac{c}{2\pi} \cdot \omega} = \frac{4\pi R(t)}{c \cdot 2\pi}. \quad (10)$$

El tiempo total que tarda la señal en recorrer la distancia de ida y vuelta entre el radar y el blanco será

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c}. \quad (11)$$

Si se ignora el cambio que pueda haber la distancia durante el tiempo en el que viaja la señal, dado que $\frac{dR}{dt} \ll c$, y sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (11)

tenemos el tiempo con la distancia en el momento en que es recibida la señal

$$\tau(t) = \frac{2(R_0 + \frac{dR(t)}{dt}t)}{c}. \quad (12)$$

Ahora, sustituyendo la ecuación (12) en la ecuación (4) tenemos que la señal reflejada $v_R(t)$ se expresa como

$$v_R(t) = \text{sen} \left(2\pi f_T \left(t - \frac{2(R_0 + \frac{dR(t)}{dt}t)}{c} \right) + \phi_0 \right). \quad (13)$$

Desarrollando la expresión (13):

$$v_R(t) = \text{sen} \left(2\pi f_T t - 2\pi f_T \left(\frac{2(R_0 + \frac{dR(t)}{dt}t)}{c} \right) + \phi_0 \right), \quad (14)$$

$$v_R(t) = \text{sen} \left(2\pi f_T t - 4\pi f_T \left(\frac{R_0}{c} \right) - 4\pi f_T \left(\frac{\frac{dR(t)}{dt}t}{c} \right) + \phi_0 \right). \quad (15)$$

Finalmente obtenemos que la ecuación de voltaje de la señal recibida se describe como:

$$v_R(t) = \text{sen} \left(2\pi f_T t - 4\pi f_T \left(\frac{R_0}{c} \right) - 2\pi f_T \cdot \frac{2}{c} \left(\frac{dR(t)}{dt}t \right) + \phi_0 \right). \quad (16)$$

Considerando que el blanco está en movimiento se tiene que tanto la distancia como la fase están cambiando continuamente. Un cambio en fase con respecto al tiempo es igual a la frecuencia angular Doppler. Además, se sabe que la fase tendrá un signo positivo o negativo, dependiendo de la dirección del objeto en movimiento, un signo positivo cuando el blanco se esté acercando al receptor y negativo cuando se este alejando [Barton *et al.*,1998], así derivando la ecuación 6 tenemos

$$\omega_d = \pm \frac{d\phi_T}{dt} = \pm \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt}, \quad (17)$$

la frecuencia angular Doppler formada puede ser transformada y está definida como

$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = \pm \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (18)$$

Se sabe que $\lambda = \frac{c}{f}$, por lo que podemos substituir λ en la ecuación (18), quedando

$$f_d = \pm \frac{f_T}{c} \frac{2dR(t)}{dt}. \quad (19)$$

De las ecuaciones (19) y (16) se tiene que

$$v_R(t) = \text{sen} \left(2\pi f_T t - 4\pi f_T \left(\frac{R_0}{c} \right) - 2\pi f_T t \left(\pm \frac{f_d}{f_T} \right) + \phi_0 \right). \quad (20)$$

Reduciendo la ecuación (20) obtenemos:

$$v_R(t) = \text{sen} \left(2\pi t (f_T \pm f_d) - 4\pi f_T \left(\frac{R_0}{c} \right) + \phi_0 \right) \quad (21)$$

De esta manera a partir de la ecuación (21) podemos ver que la frecuencia de la señal recibida será:

$$f_R = f_T \pm f_d. \quad (22)$$

Así el efecto Doppler consiste en el desplazamiento de la frecuencia medida causado por la velocidad relativa emisor-detector. De esta manera, podemos ver que una señal electromagnética con una cierta frecuencia al chocar con un objeto en movimiento tendrá una cierta desviación en la frecuencia dependiendo de su velocidad y dirección. Este comportamiento se ejemplifica en la figura 1. En base a este fenómeno podemos decir, que si mediante un cierto mecanismo logramos separar el valor de la frecuencia Doppler generada, ésta será directamente proporcional a la velocidad relativa del blanco. Con esta consideración, más adelante nos evocaremos a encontrar el diseño óptimo del radar que nos permita lograr este objetivo.

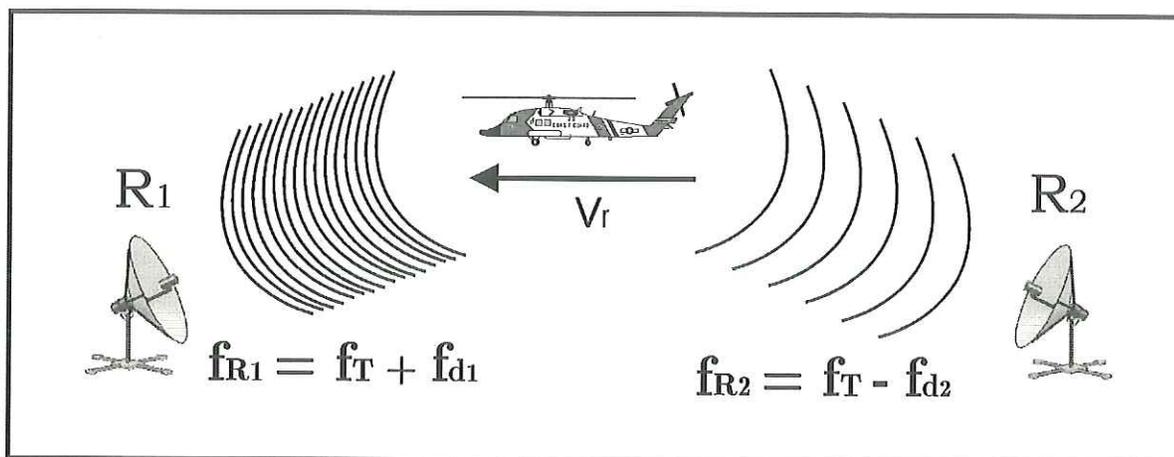


Figura 1 Ilustración de la aparente compresión y descompresión de las ondas electromagnéticas a causa del efecto Doppler.

II.3 Frecuencia modulada.

Otro de los mecanismos físicos básicos utilizados en los radares es la modulación. En esta sección nos referimos en concreto a la frecuencia modulada. Debemos comprender los conceptos teóricos asociados a este tipo de modulación para aplicarla a nuestros propósitos.

Para generar la frecuencia modulada, se debe suponer que se cuenta con un oscilador, representado frecuentemente en adición a un circuito LC, el cuál controla la frecuencia de una señal senoidal producida por el oscilador, como se muestra en la figura 2. El oscilador debe de considerarse un dispositivo que genera su propia señal; a la salida se tendrá una señal que estará variando su frecuencia en tanto varíen los valores del capacitor o del inductor.

El primer parámetro que involucra la frecuencia modulada es la desviación en frecuencia (f_D), esta nos indica que tanto la frecuencia portadora de FM se desvía de

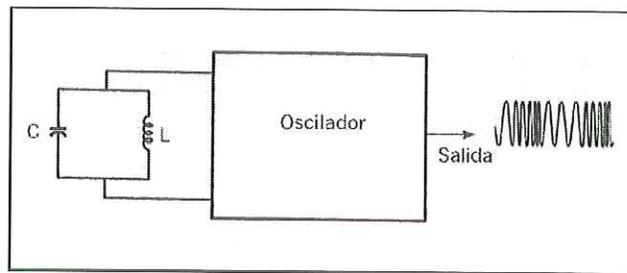


Figura 2 Frecuencia modulada generada por un oscilador y un circuito LC variable.

su frecuencia normal. La frecuencia a la cual una portadora de FM no tiene ninguna modulación es llamada frecuencia normal o frecuencia central (f_C). Como se puede observar en la figura 3, la desviación en frecuencia (f_D) de la portadora de FM, es causada por la amplitud de la señal modulada. Se puede decir que el valor de la desviación en frecuencia es proporcional a la amplitud de la señal modulada.

La desviación total que sufre la señal portadora, desde la frecuencia más baja hasta la más alta; esto es desde el menor valor que toma la variación de la frecuencia modulada a causa del valor mínimo de voltaje, hasta el valor mas alto en frecuencia debido al máximo valor en amplitud se denomina "swing" de la portadora (f_{CS}) y está dado por la relación siguiente

$$f_{CS} = 2f_D. \quad (23)$$

La frecuencia superior (f_H) de la portadora de FM es igual a la frecuencia central (f_C) más la desviación de frecuencia (f_D). De la misma manera, la frecuencia inferior (f_L) sera igual a la frecuencia central (f_C) menos la desviación de frecuencia (f_D).

Tenemos que

$$f_H = f_C + f_D, \quad (24)$$

$$f_L = f_C - f_D. \quad (25)$$

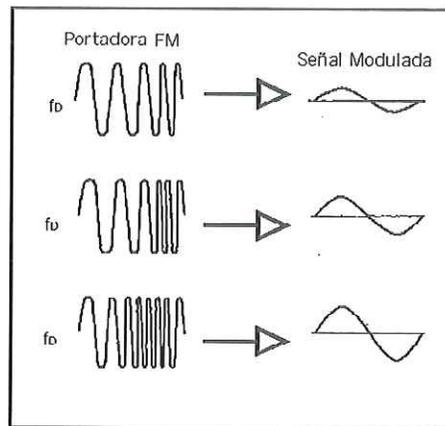


Figura 3 Relación de la desviación en frecuencia de la portadora de FM con la amplitud de la señal modulada.

La frecuencia de la señal modulada tiene un efecto directo sobre la portadora de FM en el sentido de que tan rápido cambia la frecuencia de la señal de FM; esto es llamado razón de cambio. Podemos decir que la amplitud de la señal modulada determinará qué tanto se desvía la frecuencia de la portadora de FM de su frecuencia central y la frecuencia de la señal modulada nos dará la velocidad con la que la varía la frecuencia en la portadora de FM.

Un parámetro importante cuando hablamos de FM y sobre todo para entender ciertas especificaciones en sistemas es el índice de modulación. Se sabe que el ancho de banda y la razón de cambio de la portadora de FM está directamente relacionada con la amplitud y la frecuencia de la señal modulada, con esto el índice de modulación está dado por:

$$m_I = \frac{f_D}{f_M} \quad (26)$$

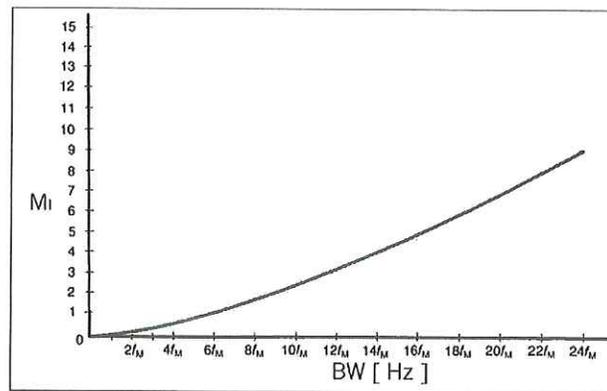


Figura 4 Relación gráfica entre el índice de modulación y el ancho de banda de la señal portadora.

siendo m_f el índice de modulación, f_D la desviación en frecuencia y f_M la frecuencia de la señal modulada. El índice de modulación está totalmente relacionado con el ancho de banda (BW) de la portadora de FM, como se observa en la figura 4 [Adamson, 1992.]

Más adelante veremos los beneficios de utilizar la modulación en frecuencia en un sistema de radar; dado que a veces se requieren ciertas "marcas", que nos puedan permitir tener una mayor información sobre el blanco. Debemos utilizar mecanismos como la modulación de la señal que nos den, por ejemplo, una marca de tiempo que sería útil para calcular la distancia sin depender del tiempo en que tarde la señal en ir y regresar del blanco, lo cual sería imposible si se utilizan radares de onda continua.

II.4 Ecuaciones y parámetros del Radar.

A continuación, se dan los parámetros generales, para todo los radares, independientemente de su aplicación o su construcción física, este es el tronco común que define su funcionamiento y sus variables. Estos parámetros son referentes principalmente a su

interacción y comportamiento con las ondas electromagnéticas, independientemente de su mecanismo para procesarlas.

El primer parámetro importante a presentar es referente a los radares de tipo pulsado. Para empezar, retomaremos el desarrollo matemático hecho anteriormente sobre el efecto Doppler y despejando $R(t)$ de la ecuación (11) tenemos que

$$R(t) = \frac{\tau \cdot c}{2}, \quad (27)$$

siendo $R(t)$ la distancia a la que se encuentra el blanco. Ahora, si consideramos f_P como la frecuencia de repetición entre un pulso y otro, en el caso que se estén utilizando radares pulsados tenemos que está debe ser

$$f_P \leq \frac{1}{\tau}. \quad (28)$$

Con esto garantizamos que no se traslapen los pulsos que se están recibiendo en el receptor del radar. A partir de esto podemos tener que la máxima distancia inequívoca $R(t)_{INE}$ será $f_P = \frac{1}{\tau}$ por lo tanto la ecuación (27) puede expresarse como

$$R(t)_{INE} = \frac{\frac{1}{f_P} \cdot c}{2}, \quad (29)$$

$$R(t)_{INE} = \frac{c}{2 \cdot f_P}. \quad (30)$$

La ecuación (30) nos da la máxima distancia a la cual puede estar el blanco del radar sin que se obtengan datos erróneos.

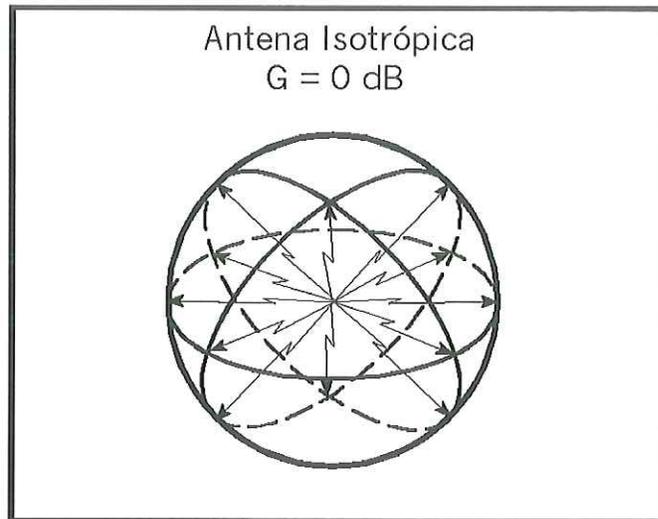


Figura 5 Patrón de radiación de una antena isotrópica.

Ahora, para cualquier tipo de radar podemos decir que si se transmite con una potencia de salida P_T y además se utiliza una antena isotrópica, la densidad de potencia dada en Watts por unidad de área, que se tendrá a una cierta distancia R_P será igual a la potencia transmitida dividida entre la superficie de una esfera imaginaria de radio R_P como se muestra en figura 5. Considerando que se tiene una antena isotrópica es decir con una ganancia unitaria $G = 1$, podemos de esta manera dar la siguiente expresión para obtener la densidad de potencia P_{DP} :

$$P_{DP} = \frac{P_T}{4\pi R_P^2} 1. \quad (31)$$

En el caso de utilizar una antena directiva, como es lo usual en sistemas de radar, la ganancia G de la antena se mide por el incremento de potencia radiada en la dirección del blanco y comparándola con la potencia que se obtendría en una antena isotrópica

Tabla I Valores típicos del "radar cross section" para distintos blancos.

Blanco	σ [m ²]
Insecto	10 ⁻⁵
Pajaro	0.01
Misil Pequeño	1
Hombre	1
Avion Pequeño	2
Avion Caza	10
Avion Comercial	40
Automovil	100

como se ilustra en la figura 6. La densidad de potencia en un punto con una antena que tiene una ganancia de transmisión G cualquiera se expresa como:

$$P_{DP} = \frac{P_T}{4\pi R_P^2} G. \quad (32)$$

El blanco intercepta una parte de la potencia incidente y la vuelve a radiar en todas direcciones. La medida de la propiedad que tiene un objeto para reflejar la potencia incidente en la dirección del radar es denotada como " σ " llamada *radar cross section*. Esta es una medida de un área que nos da una referencia de la capacidad que tiene un blanco de reflejar señales en la dirección del receptor del radar. El *radar cross section* puede verse como una comparación de la potencia que tiene una señal reflejada de un cierto blanco, con la señal reflejada que tendría una esfera perfectamente lisa de un área de 1 m² (figura 7). Se puede relacionar σ con la densidad de potencia de la señal reflejada por el radar mediante:

$$P_{DPR} = \frac{P_T}{4\pi R_P^2} G \frac{\sigma}{4\pi R_P^2}. \quad (33)$$

El *radar cross section* tiene unidades de área. Esta es una característica particular del blanco que se tenga como se muestra en laTabla I [Levanon, 1988] y en la figura



Figura 6 Iluminación de una antena direccional en comparación con una antena isotrópica.

8. Así, la antena del radar captura parte del eco de la señal. Si el área efectiva de la antena receptora es denotada por A , la potencia recibida por el radar estará dada por

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi R_P^2} G \frac{\sigma}{4\pi R_P^2} A. \quad (34)$$

simplificando la ecuación 34, tenemos

$$P_R = \frac{P_T G \sigma A}{(4\pi)^2 R_P^4}. \quad (35)$$

Continuando con las expresiones del radar, podemos hablar de un parámetro fundamental en estos sistemas, ésta es la distancia máxima que puede existir entre el blanco y el radar. Esto dependerá directamente de la potencia transmitida, la densidad de potencia reflejada y la potencia mínima que puede detectar el radar.

Tenemos que la mínima potencia que puede ser detectada por el radar es P_m . A partir de esta se puede obtener la distancia máxima R_{\max} a la cual el blanco puede ser

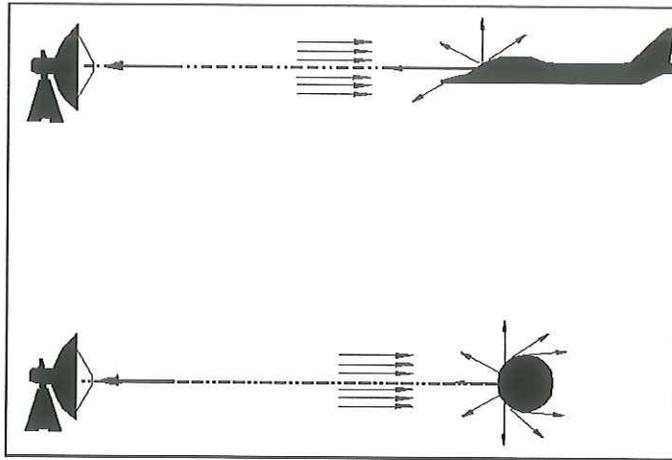


Figura 7 *Radar cross section* para un blanco y una esfera perfecta con un área de un metro cuadrado.

detectado, y se dará cuando:

$$P_m = P_R \quad (36)$$

Ahora, sustituyendo la ecuación (36) en la ecuación (32) y despejando R_P tenemos:

$$R_P = R_{\max} = \left[\frac{P_T \cdot G \cdot \sigma \cdot A}{(4\pi)^2 P_m} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (37)$$

La ecuación (37) da la distancia máxima en función del área y la ganancia de la antena. Dado que estos parámetros están relacionados, podemos simplificar esta expresión solo en los casos en los que se utiliza la misma antena de transmisión y recepción. Para esto debemos referirnos a la ecuación de teoría de antenas [García, 1992], que relaciona la ganancia transmitida G y el área efectiva de la antena A

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2}. \quad (38)$$

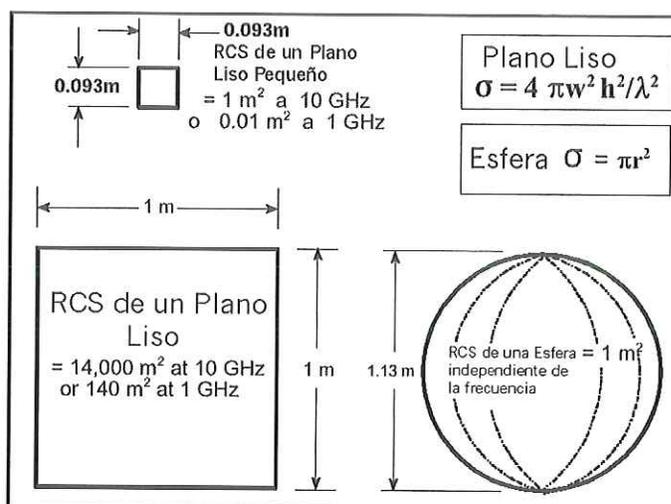


Figura 8 *Radar cross section* de una esfera y un plano.

Tomando en cuenta que la mayoría de los radares usan la misma antena para recepción y transmisión ponemos encontrar de la ecuación (38) que

$$A = \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (39)$$

y sustituyendo la ecuación (39) en la ecuación (37) tenemos:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_T G \sigma \frac{G\lambda^2}{4\pi}}{(4\pi)^2 P_m} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (40)$$

Simplificando la ecuación (40) obtenemos:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_T G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_m} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (41)$$

Con esto tenemos la distancia máxima R_{\max} en función de la ganancia de la antena.

De manera similar para tenerla en función del área total de la antena, sustituimos la ecuación (38) en la ecuación (37), encontrando que

$$R_{\max} = \left[\frac{P_T \frac{4\pi A}{\lambda^2} \sigma A}{(4\pi)^2 P_m} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (42)$$

simplificando

$$R_{\max} = \left[\frac{P_T \sigma A^2}{4\pi P_m \lambda^2} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (43)$$

El desarrollo anterior nos da una visión del funcionamiento teórico y físico básico de los radares, con lo cual tenemos un punto de partida para utilizar y desarrollar un sistema que se ajuste a nuestras necesidades y podamos planear la manera de relacionar estos parámetros y hacerlos interactuar con la superficie del mar con el objetivo de lograr hacer mediciones.

II.5 Los parámetros del Radar y la superficie del mar

El estudio de la superficie del mar en regiones costeras tiene importancia en la ingeniería de costas y en particular en actividades como el diseño y construcción de puertos, las obras de protección costera con rompeolas y espigones, y los cálculos de transporte litoral. Aunque la tecnología ha tenido avances significativos, el costo de la instalación, mantenimiento y recuperación de los instrumentos necesarios para medir el oleaje es excesivo y algunas zonas son de difícil acceso, de gran energía o de mucha actividad pesquera o turística, elevando el costo de operación y el riesgo de que los instrumentos de medición se pierdan. Así pues, la implementación de sensores remotos como pueden ser los radares, tiene numerosas ventajas con respecto a otros métodos de medición.

Los dispositivos de microondas que funcionan desde satélites tienen la capacidad de observar extensiones oceánicas con ángulos de incidencia entre 70° y 90° desde un plano horizontal. Sin embargo, para lograr el estudio particular de ciertas zonas costeras con dimensiones del orden de decenas de metros, se utilizan sensores remotos,

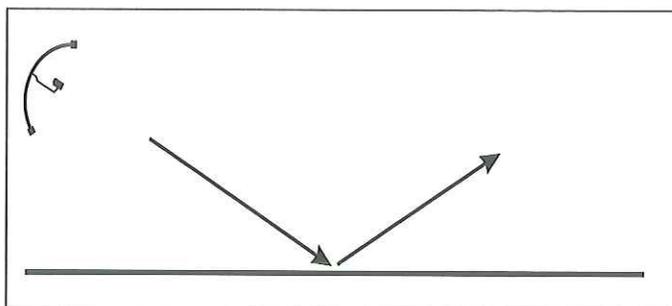


Figura 9 Reflexión especular en la superficie del mar.

como radares instalados en la zona costera y se tienen ángulos de incidencia cercanos a 0° [Poulter *et al.*, 1990]. En estos sensores los objetos son detectados por la iluminación del radar, utilizando energía electromagnética. El campo eléctrico que genera el radar puede estar polarizado en el plano vertical u horizontal de modo que la reflexión de las microondas depende de las propiedades físicas y geométricas que tenga el objeto con el que estas están interactuando. Al ser emitida una señal proveniente del radar, parte de la señal transmitida, regresa a la antena receptora mediante dos mecanismos de reflexión que dependen básicamente de la rugosidad de la superficie reflectora y del ángulo de incidencia de la radiación. Esta reflexión puede ser de dos tipos:

a) reflexión especular: cuando la señal choca con una superficie lisa o suave y las ondas electromagnéticas son reflejadas especularmente como en un espejo (figura 9).

b) reflexión difusa: cuando la señal choca con una superficie rugosa y esta es reflejada en muchas direcciones con una gran variedad de ángulos (figura 10).

Se puede hablar de una tercera forma de reflexión en la cuál la se puede considerar como una mezcla de las dos anteriores donde la mayor parte de la energía es reflejada con un ángulo constante y una muy pequeña parte de la señal es reflejada con uno o

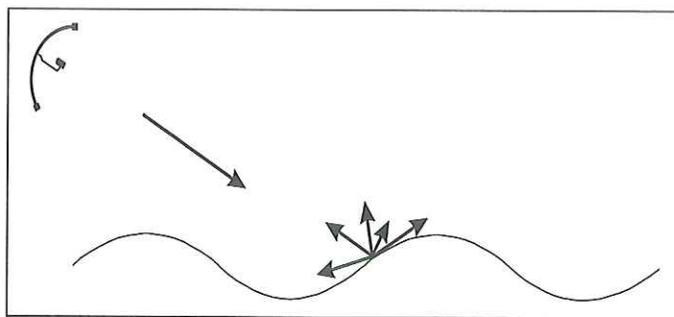


Figura 10 Reflexión difusa en la superficie del mar.

más ángulos. Cuando el tren de ondas enviado por el radar choca contra algún objeto cuya superficie presenta cierto grado de rugosidad, la energía es reflejada en distintas direcciones y una pequeña cantidad regresa a la antena receptora. La cantidad de energía que llegue a la antena receptora dependerá directamente del ángulo de incidencia con el que la onda electromagnética incide sobre la superficie rugosa. Los radares que se utilizan en altímetros montados en satélites y aeroplanos obtienen la señal por reflexión especular principalmente.

A continuación se presentan las expresiones básicas para el cálculo de la velocidad del frente de onda de las olas sobre la superficie del mar [Connan *et al.*, 1999]. Tenemos que:

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d), \quad (44)$$

donde:

ω : es la frecuencia angular de las olas.

g : es la constante de gravedad de la tierra, usualmente en promedio $9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

k : es el desplazamiento en fase o número de onda, dado por $k = \frac{2\pi}{\lambda} [m^{-1}]$.

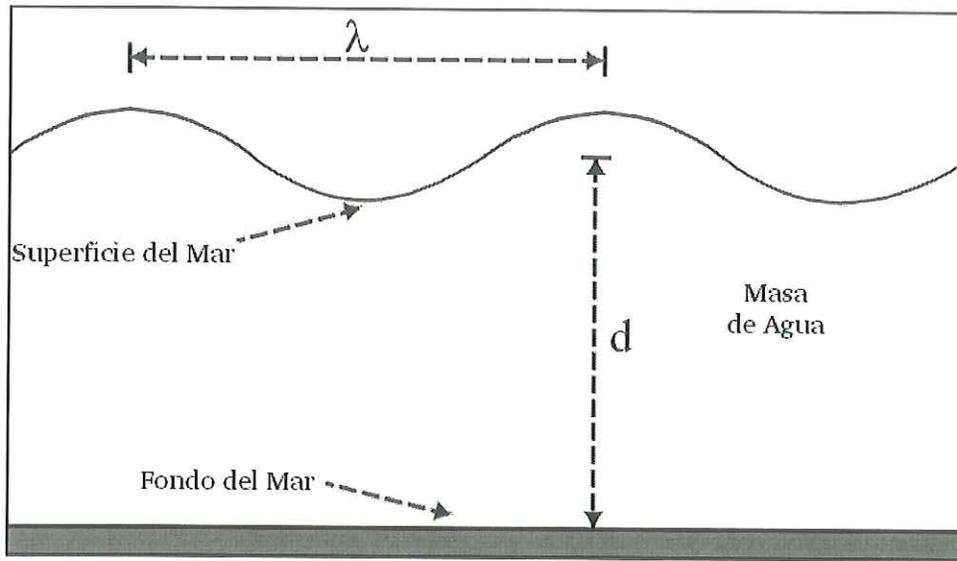


Figura 11 Datos a considerar en el cálculo básico de la dinámica en la superficie del mar.

d : la distancia entre la superficie del mar y el fondo.

λ : la longitud de onda de las olas del mar.

Se sabe que la velocidad de fase de las olas es igual a la frecuencia angular entre el desplazamiento de la fase [Oppenheim *et al.*, 1994]:

$$v = \frac{\omega}{k}, \quad (45)$$

y dividiendo entre k^2 la ecuación (44) tenemos:

$$\frac{\omega^2}{k^2} = \frac{g}{k} \cdot \tanh(k \cdot d) = v^2. \quad (46)$$

A partir de la ecuación (46) tenemos que la velocidad de fase de las olas (en la dirección de propagación) es:

$$v = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(k \cdot d)}. \quad (47)$$

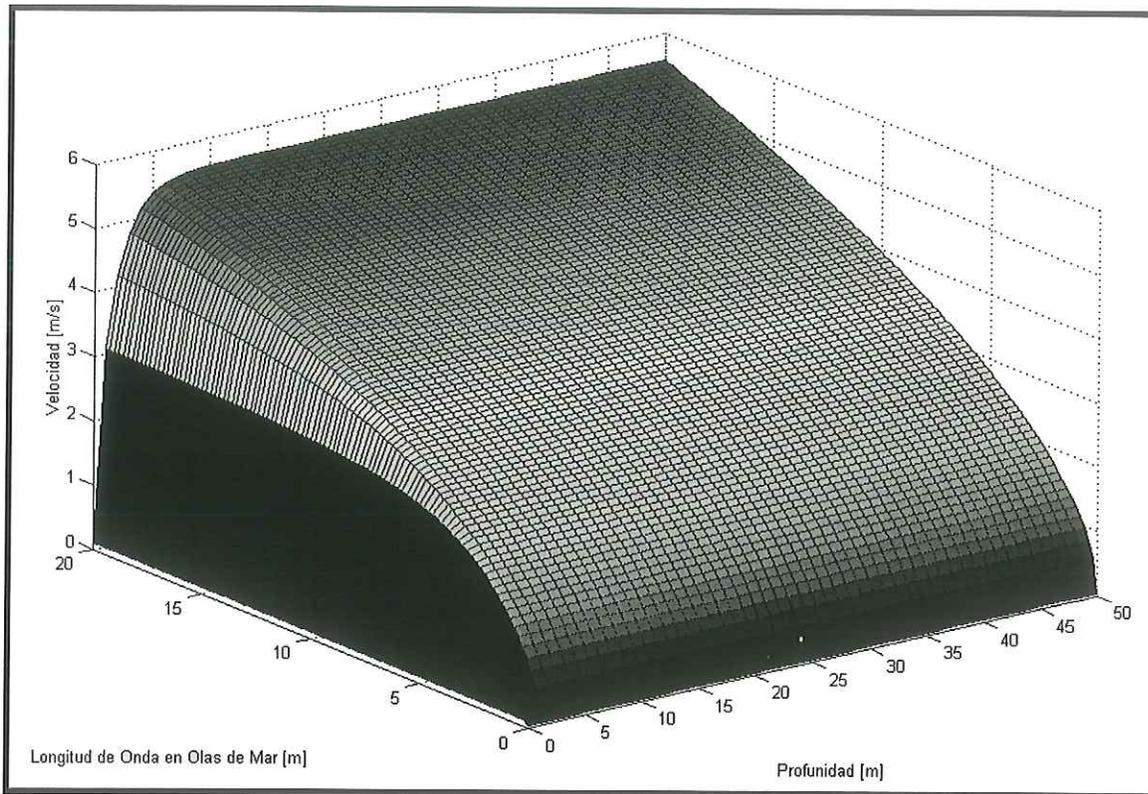


Figura 12 Relación entre la velocidad de fase del oleaje, su longitud de onda y la profundidad.

Con las expresiones anteriores es posible establecer una primera relación entre los parámetros del radar y la superficie del mar. Primeramente se deben tener en cuenta algunas características dinámicas de la superficie del mar. Como se muestra en la figura 12, se tiene un límite aproximado para la velocidad que pueden alcanzar las olas de mayor longitud. Cuando se encuentran cerca de la zona costera esta velocidad es de aproximadamente 5.5 m/s, siendo este un dato útil que nosotros podemos utilizar para más adelante poder establecer ciertas características en el diseño.

A partir de la ecuación 19 podemos relacionar la velocidad del blanco, en este caso la velocidad del frente de onda de las olas de mayor longitud con la frecuencia

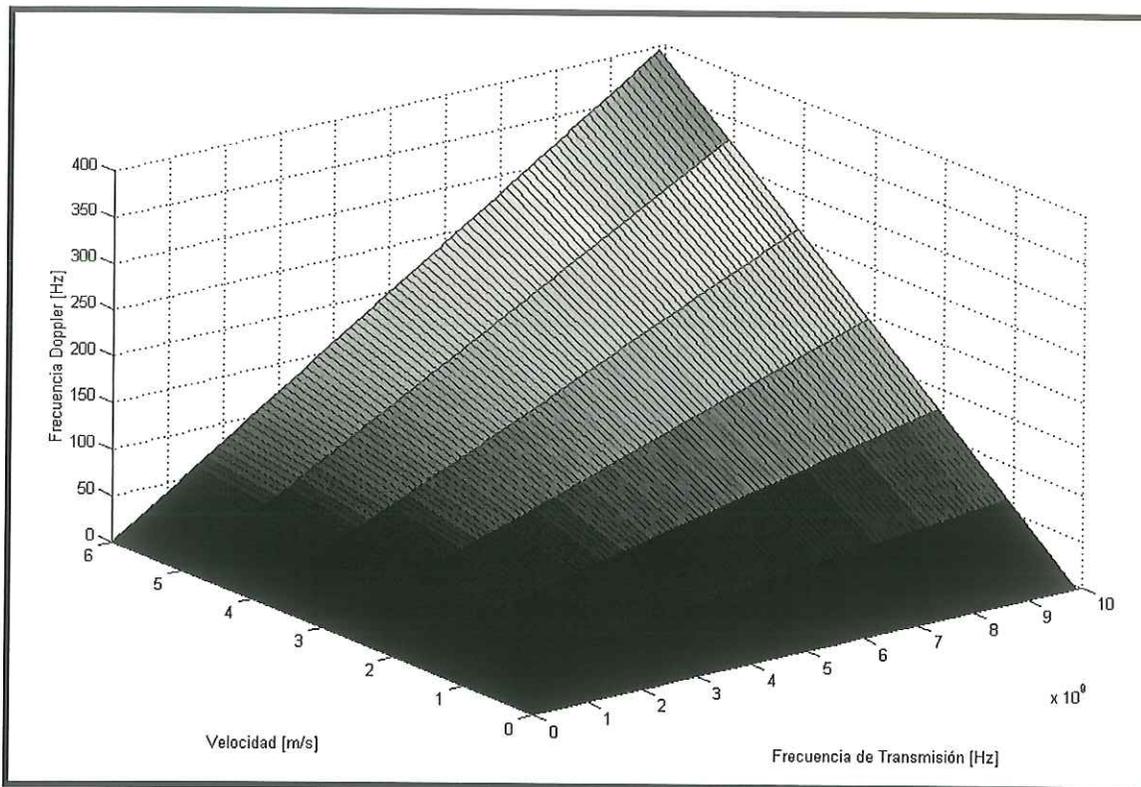


Figura 13 Relación entre la frecuencia Doppler generada, la velocidad de las olas y la frecuencia de transmisión del radar.

de transmisión, para obtener un cierto rango de respuesta en la frecuencia Doppler. Esto es un marco de referencia con el cual podemos estimar aproximadamente que frecuencia Doppler estaremos obteniendo y tenerlo en consideración para el diseño del radar, principalmente durante el análisis de la señal recibida.

Otra cuestión que hay que tener en consideración es que la superficie del mar no esta compuesta únicamente por olas de gran amplitud y completamente lisas. Este será un caso muy difícil de presentarse en la realidad. La superficie del mar está compuesta por un sin numero de olas "pequeñas" generadas usualmente por el viento y que viajan con una longitud, una frecuencia y una velocidad propia siendo estas totalmente

independientes al comportamiento que tengan las olas de mayor longitud, que pueden tener orígenes no necesariamente en el viento que se presente en ese momento, sino que pueden ser formadas por mareas, atracción gravitacional o tormentas que se producen a cientos de kilómetros de la costa [Longuet-Higgins, 1986].

Para el diseño del radar se debe tener claro que las olas de longitud de onda pequeña, λ alrededor de 5 cm, son las que reflejarán con mayor intensidad la señal de microondas. Esto, debido en parte a que la longitud de onda de las señales electromagnéticas transmitidas por radares utilizados en aplicaciones oceanográficas son del orden de centímetros. Por lo tanto los reflectores más adecuados son precisamente las olas con tamaños cercanos a λ . Dado que la generación sobre la superficie del mar de este tipo de olas es directamente proporcional a la velocidad del viento [Komen, 2000], podemos pensar que existe una relación entre la potencia de la señal recibida, reflejada por estas olas, y la velocidad del viento, debido a que se tienen un mayor número de pequeños reflectores formados por las olas de menor amplitud generadas por el viento. Por lo anterior se debe contemplar la implementación en el radar de un sistema que nos permita medir la densidad de potencia reflejada en la dirección del radar.

En la figura 14 se puede ver que, una vez que la señal del radar llega a la superficie del mar, es reflejada en todas direcciones y sólo una parte regresa al radar. Como se dijo anteriormente, con una potencia proporcional a la altura de las olas de longitud similar a la de las microondas. Pero por otro lado, dado que el radar que se desea implementar es de tipo Doppler, debemos estimar la velocidad relativa que obtendremos al procesar nosotros la señal recibida. Como se observa en la figura 14, la velocidad será

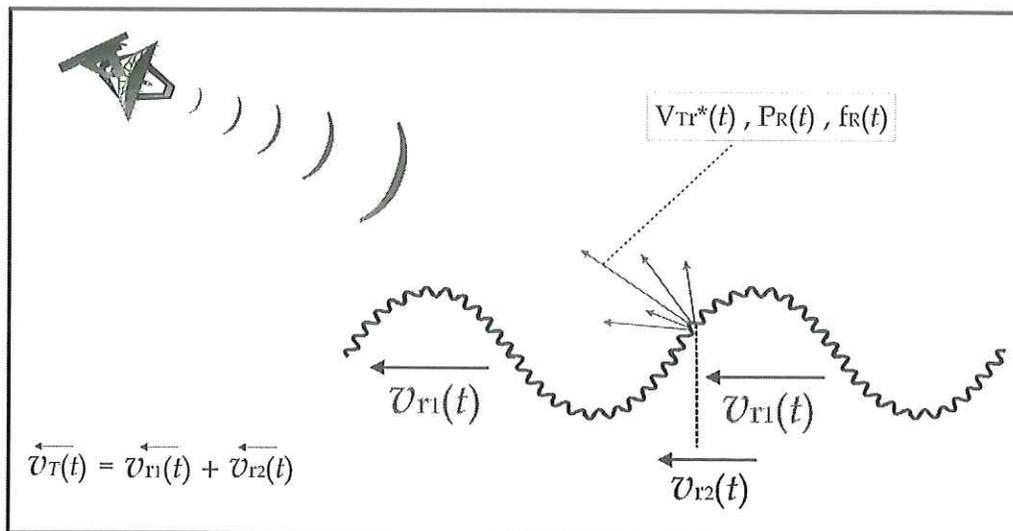


Figura 14 Comportamiento que tienen las olas de menor amplitud sobre las de mayor amplitud, y el tipo de respuesta en función de la velocidad para un instante de tiempo.

una suma vectorial de la velocidad relativa de las olas de mayor longitud, que viajan sobre la superficie del mar, con la velocidad de las olas que estén reflejando a la señal incidente en un cierto momento de tiempo t . Esta velocidad será válida únicamente para un cierto instante, ya que al viajar los dos frentes de onda de manera independiente no se puede decir que la suma sea igual para cualquier instante. La variación en la frecuencia Doppler que obtengamos será descriptiva, por un lado, de la velocidad del frente de onda de las olas de mayor amplitud y, por el otro, de la velocidad de las olas pequeñas que van montadas en las olas mayores. Cabe mencionar que, pensando en que el radar pudiera estar calibrado para relacionar la frecuencia Doppler resultante con una velocidad "exacta", el resultado que obtendríamos nunca nos daría una medición precisa de la velocidad, pero si una relación equivalente [Koryu, 1970], esto debido a que la mancha del radar, no está direccionada únicamente con un solo blanco, sino

que abarca una infinidad de blancos en movimiento, en nuestro caso olas. Sin embargo nuestro objetivo no es estudiar la velocidad exacta de las olas, sino una cantidad que nos pueda relacionar la cantidad de movimiento que existe en estas y poderla asociar a otros factores físicos externos.

Desafortunadamente no se puede establecer una relación matemática que describa la dinámica de estas olas en función de parámetros distintos a la velocidad del viento y, dado que la velocidad del viento puede tener variaciones de cero a varios metros por segundo, solo podremos decir que los instrumentos requeridos por el radar tendrán que ser muy sensibles para detectar cambios pequeños en el movimiento de las olas.

II.5.1 *Clutter*

Otro parámetro que es necesario entender y que aparecerá permanentemente en cualquier sistema de radar es el clutter. Se define como los ecos no deseados, que provienen típicamente de la tierra, del mar, la lluvia, pájaros, insectos etc. No existe una definición del clutter única, ya que lo que para un usuario de radar sería clutter, para otro no. En el caso de un meteorólogo, la respuesta que obtendría un radar cuando es dirigido hacia una zona de lluvia sería muy útil para sus estudios, mientras que para un piloto la respuesta causada por la lluvia representaría una señal no deseada o ruido (clutter).

Los efectos del clutter en la detección de un blanco son muy variados, puede ser que oculte los blancos o que genere falsas alarmas de blancos que no existen o bien incrementa el error en los datos cuando se realizan mediciones o seguimientos. Para minimizar estos efectos los diseñadores tratan de reducir el haz de iluminación del radar para ayudar a disminuir la presencia del clutter; además, en los radares modernos se

aplican técnicas de procesamiento digital de la señales con ese mismo fin. En sistemas más simples de radar se utilizan metodos basados en la detección de la frecuencia Doppler para reducir el efecto del clutter. En algunos casos elevar el nivel de frecuencia o modificar la polarización utilizada pueden ayudar en la reducción del clutter.

Las fuentes de clutter en los sistemas de radar pueden ser de tres tipos:

-*Discretas o puntuales*: El clutter puede ser descrito por lugares específicos y *Radar Cross Section* propios.

-*Superficial*: El Clutter es causado por una reflectividad adimensional llamada *Normalized Radar Cross Section*, dado en m^2 de *Radar Cross Section* por m^2 de superficie.

-*Volumétrica*: Este es causado por una reflectividad dada en m^2 de *Radar Cross Section* por m^3 de volumen.

El conocimiento del fenómeno clutter es de vital importancia en el procesamiento de la señal recibida en un radar, ya que de éste dependerá la interpretación de los resultados o seguimientos del blanco. Siempre se deberá tener claro que prácticamente es imposible tener señales puras provenientes únicamente del blanco que se desea detectar o estudiar, la señal recibida siempre estará contaminada por un sin número de factores los cuales deben ser siempre tomados en consideración.

II.5.2 Polarización

Una propiedad de las ondas electromagnéticas que tiene una relación muy importante con la respuesta que se obtendrá por parte de la superficie del mar, es la polarización que tengan éstas al ser transmitidas y o recibidas. La polarización de una onda electro-

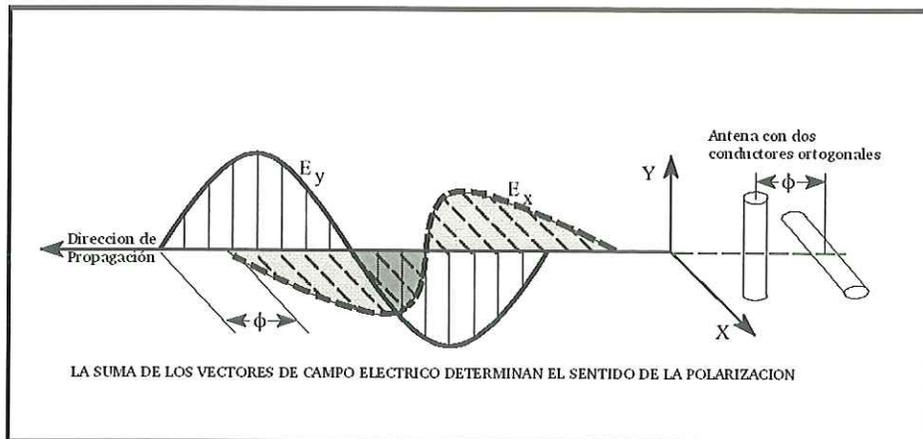


Figura 15 Dirección de propagación de una onda electromagnética en relación a la posición de un conductor.

magnética está definida como la orientación del vector de campo eléctrico. Se sabe que el vector de campo eléctrico es perpendicular tanto al vector de campo magnético como a la dirección en la que viaja la onda. El estado de polarización de una onda electromagnética se describe en términos de la proyección de la figura geométrica, trazada por el vector de campo eléctrico sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación. Una onda electromagnética se puede representar como la suma de dos componentes ortogonales como se muestra en la Figura 15. Dado que la superficie del mar no es un blanco con el cuál nosotros podamos asegurar cual será la mejor respuesta que obtendremos a una cierta polarización, aunque hay trabajos previamente hechos que indican una polarización optima en ciertas condiciones, debemos tener en consideración que el sistema a realizar sea capaz de modificar la polarización de la señal dependiendo de las condiciones del mar o de los objetivos de estudio sobre el blanco que el usuario disponga, de tal manera que el uso de varios estados de polarización nos dará mas información.

III SISTEMAS Y CONFIGURACIONES.

En este capítulo se abordaran los distintos sistemas de radar que han probado ser adecuados para el estudio de la superficie del mar [Plant *et al.*, 1990]. Debido a que prácticamente son ilimitadas las opciones que puede tener un sistema de radar en cuanto a su diseño y componentes que pueden constituirlo, aquí solo se darán los diseños y sus propiedades básicas, adecuandolos a nuestras limitaciones y necesidades.

III.1 *Tipos fundamentales de Radares.*

En la actualidad existen una gran cantidad de tipos de radar encaminados a un sin numero de aplicaciones, sin embargo muy pocos son los que se pueden o por lo menos son utilizados para aplicaciones como las que se nos presentan en esta investigación. El hecho de que un radar sea factible o no para la mediciones en la superficie del mar, no depende de una regla definida o de alguna limitación física. De hecho, prácticamente cualquier radar o sensor remoto que emita ondas electromagnéticas y tenga la capacidad de recolectarlas puede ser utilizado para realizar ciertas mediciones. A lo largo de los últimos años se han hecho investigaciones de toda índole en busca de diseños de radar que puedan darnos un mayor número de datos acerca de la dinámica y la composición de la superficie del mar. Sin embargo, la mayor cantidad de recursos se han invertido en sensores remotos de largo alcance, como los que se colocan en los satélites de observación terrestre. Comúnmente se utilizan radares de abertura sintética, los cuales mediante un procesamiento en la fase de la señal que reciben logran actuar como un radar con una

antena de dimensiones muy grandes; lo cuál hace posible tener un haz de iluminación pequeño y hacer barridos precisos de la superficie terrestre ya sea sobre el océano o la tierra firme [Rosen *et al.*, 2000]. Sin embargo, este tipo de tecnología es sumamente costosa y generalmente se encuentra en manos de unos pocos países. Además, su utilización para el estudio de un punto específico de la superficie del mar, como sería una zona costera en la mayoría de los casos no sería costeable. En lo que cabe a sensores remotos de corta distancia, los cuales son colocados en la superficie terrestre y en este caso a unos pocos cientos de metros del blanco en la superficie del mar, se han hecho investigaciones poco complejas en comparación a las anteriores. Por otra parte se ha demostrado que los tres tipos de radares mas factibles para estudiar la interacción de las ondas electromagnéticas y la superficie del mar, son los que se describen a continuación. Nos basaremos en estos debido a que una investigación sobre radares alternos que podrían utilizarse en este tipo de mediciones requeriría un manejo y un estudio previo de la tecnología de radares en todos su ámbitos y aplicaciones. En México no se cuenta con experiencia en estos temas, lo cual nos limita a basarnos en investigaciones reportadas en la literatura.

III.1.1 *Radar pulsado.*

El tipo de radar más usado en todo tipo de aplicaciones es el radar pulsado, que emite una sucesión periódica de impulsos de ondas electromagnéticas en forma de un haz estrecho. Cuando estos impulsos inciden sobre un obstáculo, se refleja una parte de ellos. De esta manera se puede, si se tiene el conocimiento de la dirección de emisión

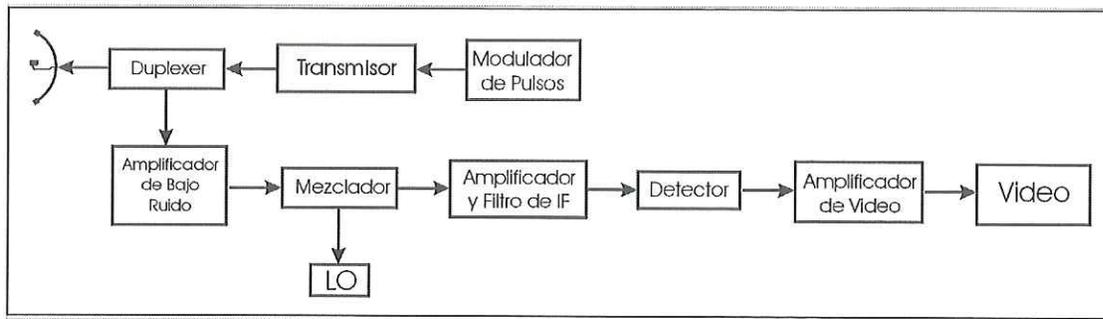


Figura 16 Diagrama a bloques básico de un radar pulsado.

y del tiempo necesario de ida y retorno de las ondas, reconocer ciertos parámetros del blanco en cuestión [Ewell, 1981].

Una instalación básica de un radar pulsado lo muestra la figura 16. En resumen, está constituida por: un sincronizador, un modulador, un transmisor, un conmutador, una antena, un preamplificador, un receptor y un indicador. El sincronizador es un generador de impulsos formado por un oscilador que determina la frecuencia de los impulsos y da el nivel de la señal. El modulador enlaza el sincronizador con el transmisor, y está constituido generalmente por un condensador que almacena la carga y la libera bruscamente cuando recibe la señal del sincronizador. Uno de los elementos mas importantes del equipo es el transmisor, que tiene la función de transformar en ondas electromagnéticas, que puedan viajar por el espacio libre, la corriente que recibe del modulador. Para bandas inferiores a 60 cm se utiliza un magnetrón de cavidades resonantes. El magnetrón sigue utilizándose en bandas de alta frecuencia, pero para ciertas bandas de baja frecuencia se ha visto desplazado por el klystron [Pozar, 1990]. Como la emisión y recepción se efectúan con la misma antena, la gran potencia de la primera destruiría al receptor si no estuviera el conmutador de emisión-recepción compuesto por

dos elementos: uno que desconecta el receptor mientras funciona el transmisor y viceversa. La antena puede tomar las más diversas formas y tamaños, pero en la práctica se utilizan antenas directivas, que son siempre de gran área y orientables. En los primeros radares, la antena estaba constituida por la red de un dipolo, pero actualmente es casi siempre un reflector parabólico, con el dipolo o la bomba electromagnética en el foco. El movimiento generalmente rítmico, de la antena define la zona de espacio explorada por el haz. El tipo de movimiento más simple es el de rotación en sentido azimutal en torno a un punto, pero puede tener otros, como el llamado de abanico resultante del movimiento rotatorio alrededor de un eje horizontal. En el radar de exploración cónica, la antena se mueve de modo que el haz describe un cono circular, y si este haz es de ángulo variable se dice que es de exploración espiral o espiraliforme. En la zona de recepción de los impulsos reflejados después de la antena suele colocarse el preamplificador, para elevar la débil energía de los ecos recogidos. El receptor suele ser superheterodino en donde la frecuencia recibida es mezclada por un oscilador local incorporado en el receptor para combinando ambas generar otra (suma o diferencia de las anteriores) la cual se fija en el receptor, y puede ser amplificada por toda una cadena amplificadora de varios pasos sintonizados a dicha frecuencia, con ello se gana selectividad. Este trabaja normalmente en bandas anchas, para evitar distorsión a en la recepción. El indicador transforma la onda recibida en un trazo luminoso. De este tipo de radar se obtienen tres datos, distancia, azimut y elevación, y se usan aparatos que dan una información visual en la cual la abscisa y la ordenada son una mancha puntiforme e indican el azimut y la elevación, la distancia viene dada por dos segmen-

tos horizontales que aparecen junto al punto reflejado, cuya longitud es inversamente proporcional a la distancia.

El espectro de frecuencias que se usa generalmente en radares convencionales pulsados, está comprendido entre 300 y 40,000 MHz, El alcance esta comprendido entre 150 m y un máximo que ha permitido localizar a la Luna e incluso planetas como Venus. La potencia del transmisor depende de la duración del impulso, y esta comprendida entre 10 KW y 10 MW . La duración del impulso frecuentemente es de microsegundos. Los progresos de la electrónica han permitido reducir considerablemente las dimensiones y eficiencia de este tipo de radares, ya que anteriormente eran equipos de un gran tamaño y de muy baja eficiencia. Estos radares han tenido un enorme desarrollo debido principalmente a los problemas que representa el desarrollo espacial y el militar, esto ha obligado a la complementación del radar con las computadoras. Las aplicaciones son muchas llegando a extremos como la guía automática de vuelos sin piloto o en la deducción de datos geográficos para el trazado de rutas de misiles, satélites artificiales y en otros sectores de industria aeroespacial

III.1.2 Radar Doppler de onda continua.

Existen muchos tipos de radares, los cuales conservan en lo general las mismas características, sin embargo, cada uno esta diseñado para una aplicación específica dependiendo principalmente del tipo de blanco que se desea estudiar.

Incluso si se tiene un mismo blanco, el diseño del radar va diferir si este blanco permanece fijo o se encuentra en movimiento. Un radar que puede distinguir los blancos fijos de los blancos en movimiento, e incluso calcular su velocidad, es el llamado radar

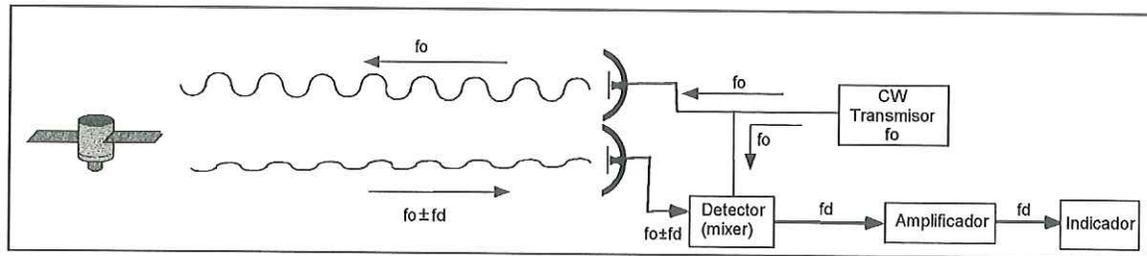


Figura 17 Esquema básico de un radar de onda continua.

de tipo Doppler. Este radar trabaja asociando los cambios en frecuencia de la señal reflejada por un objeto en movimiento con su velocidad.

El diseño mas simple de un radar Doppler de onda continua, se puede observar en la figura 17. Este diseño consta de un transmisor que genera una señal a una frecuencia f_0 la cual es radiada por la antena. Una porción de la energía radiada es interceptada por el blanco y reflejada hacia la antena. Si el blanco se encuentra en movimiento con una velocidad relativa v_r , se tendrá que la señal reflejada será:

$$f_r = f_0 \pm f_d. \quad (48)$$

Si la distancia entre el blanco y el radar se reduce, la frecuencia Doppler tendrá un signo positivo, mientras que tendrá un signo negativo cuando la distancia entre el radar y el blanco aumenta. El eco de la señal con una frecuencia f_r entra al radar por medio de la antena y es detectada por un mezclador heterodino con una porción de la señal transmitida f_0 , para producir una diferencia en frecuencia f_d . El propósito del amplificador Doppler es el de eliminar el eco de los blancos estacionarios y amplificar la señal de eco Doppler hasta un nivel que pueda ser detectado por un dispositivo indicador.

Las antenas utilizadas deben tener un correcto aislamiento entre la señal transmitida y la señal recibida. En la práctica no es posible eliminar por completo el efecto de "leakage" debido a la señal transmitida. Sin embargo, no en todos los casos se puede considerar nocivo este efecto, ya que esta señal puede ser utilizada como la referencia necesaria para la detección en el cambio de la frecuencia Doppler. Si esta señal no tiene la suficiente magnitud, se debe de introducir otra adicional al receptor para poder tener una referencia. Existen dos aspectos a considerar que limitan la tolerancia del receptor al efecto de "leakage" del transmisor. Uno es la máxima potencia que puede soportar el receptor sin sufrir un daño físico en sus circuitos y la segunda es el nivel de ruido que puede llevar consigo la señal.

Un radar que trabaje con base en el efecto Doppler puede ser de varios tipos, sin embargo el más común de ellos, cuando el radar esta enfocado únicamente a detectar la frecuencia Doppler y además no contempla otros parámetros o se tienen distancias al blanco pequeñas, se utilizan radares de onda continua Doppler. Cuando estos operan con una relativa baja potencia, una baja sensibilidad en el receptor y se tiene una sola antena, se debe de procurar tener un mayor aislamiento entre el receptor y el transmisor. La cantidad de aislamiento que se requiere depende de la potencia y calidad del transmisor, además de la sensibilidad que pueda tener el receptor. Por ejemplo si el transmisor funciona con una potencia aproximadamente de 1 KW y la potencia que puede permitir el receptor es de 10 mW, se debe tener un aislamiento entre el transmisor y el receptor de 50 dB. En la mayoría de los casos, la cantidad de aislamiento necesaria para los radares de onda continua, que manejan grandes distancias, esta determinada

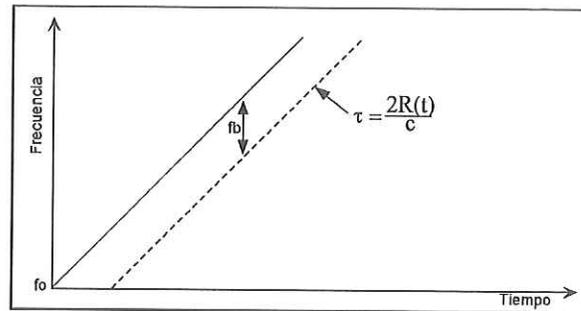


Figura 18 Incremento lineal en la frecuencia transmitida y su diferencia con respecto a la frecuencia recibida después de un tiempo τ .

por el ruido de la señal transmitida, mas que por el daño físico que pueda causar en el receptor la alta potencia que manejan [Poulter *et al.*, 1995].

El receptor en un radar de onda continua simple de una sola antena, es en algunos aspectos análogo a un receptor superheterodino. El receptor de este tipo es llamado homodino o receptor superheterodino con frecuencia intermedia cero. La función del oscilador local es reemplazada por la señal de "leakage" que proviene del transmisor. El receptor es mucho más simple que los que requieren una frecuencia intermedia, generada por un oscilador local, además de un amplificador de frecuencia intermedia. El espectro de frecuencias que se usa generalmente en radares Doppler de onda continua, está comprendido entre 0.5 GHz y 100 GHz. El alcance en distancia normalmente no rebasa un metro y llega a algunas decenas de kilometros. La potencia del transmisor es muy baja puede ser del orden de miliwatts y no supera los 10 KW [Barton *et al.*,1998].

III.1.3 Radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada.

Para que un radar Doppler de onda continua tenga la habilidad de poder medir la distancia debe de tener algún tipo de "marca" que pueda ser implementada en la señal

transmitida para medir el tiempo que tarda en viajar de ida y vuelta la señal y poder relacionarlo con la distancia al blanco. El espectro de una transmisión de onda continua puede ser ampliado mediante la aplicación de una modulación en amplitud, frecuencia o fase. Una técnica usada para ampliar el espectro de un radar de onda continua es mediante una portadora de frecuencia modulada. De esta manera la marca del tiempo está dada por el cambio de frecuencia. El tiempo de transito es proporcional a la diferencia en frecuencia entre el eco de la señal recibida y la señal transmitida [Skolnik, 1980] en un instante de tiempo. Un radar de onda continua de frecuencia modulada transmite una serie de barridos lineales de frecuencia con un cierto ancho de banda BW , durante un periodo de tiempo τ . El eco de la señal es mezclado con la señal transmitida en ese momento, obteniendo una diferencia de estas señales y formando un pulso, en el cual la frecuencia de este será directamente proporcional al rango o distancia.

En un radar FMCW (onda continua de frecuencia modulada), la frecuencia transmitida está cambiando en función del tiempo en una forma conocida. Se considera que la frecuencia transmitida crece linealmente con el tiempo, como se puede observar en la figura 18.

Si el objeto que produce la reflexión se encuentra a una distancia $R(t)$, el eco de la señal retornará después de un cierto tiempo $\tau = \frac{2R(t)}{c}$, la línea punteada representa la señal de eco. Si el eco de la señal es procesada, utilizando un mezclador heterodino con una porción de la señal transmitida, se genera una diferencia en frecuencia f_b (beat note). Si no existe un cambio en frecuencia debido al efecto Doppler, f_b será una medida

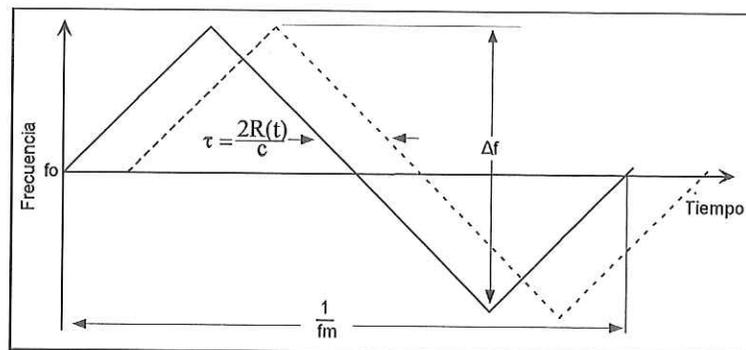


Figura 19 Señal transmitida y recibida después de un cierto tiempo τ , cuando se utiliza una modulación en frecuencia a partir de una forma de onda periódica.

de la distancia al blanco. En la práctica los radares de este tipo, no pueden tener un cambio continuo en frecuencia en una sola dirección. La periodicidad en la modulación es necesaria, como pudiera ser una modulación en frecuencia triangular, mostrada en la figura 19.

La modulación no necesariamente debe ser triangular, la frecuencia f_b resultante se puede observar en la figura 20. El diagrama que se muestra en la figura 21, ilustra el principio de un radar FMCW. Una porción de la señal transmitida actúa como referencia para poder producir f_b . Esta es introducida directamente en el receptor por medio de un cable o alguna otra forma de conexión directa. Idealmente el aislamiento entre las antenas de recepción y transmisión es lo suficientemente grande para reducir a un nivel despreciable la señal de "leakage" que proviene del transmisor. En seguida f_b es amplificada y limitada para remover todo tipo de fluctuación en la amplitud, la señal f_b limitada en amplitud puede ser medida mediante un frecuencímetro calibrado en distancia.

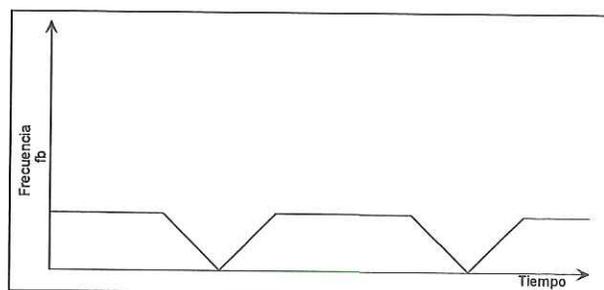


Figura 20 Frecuencia resultante de la diferencia entre la frecuencia transmitida y la frecuencia recibida.

Los radares de frecuencia modulada de onda continua, nos pueden dar información simultáneamente de distancias y cambios por el efecto Doppler de múltiples blancos. Esta información es equivalente a la que daría un radar pulsado pero sin las desventajas de este. Sin embargo, la relación señal a ruido y la calidad de la señal que se obtenga del radar va depender a grandes rasgos de la potencia transmitida de la forma de onda y el ancho de banda que se maneje, esto cuando se habla de sistemas sencillos con un bajo costo. En general los radares FMCW tienen una baja interferencia de señales electromagnéticas parásitas cuando se manejan distancias relativamente cortas, en comparación con los radares pulsados. Una de las mayores desventajas que se tienen en los radares FMCW es que el transmisor y el receptor operan de manera continua, por lo que deben ser usadas antenas separadas y muy bien aisladas para la transmisión y la recepción, esto con el fin de prevenir alteraciones de la señal como el "leakage" debido a que la potencia de la señal transmitida se sobrepone con la recibida. En estos la energía de la señal transmitida tiene un cierto efecto sobre la energía de la señal que recibe el receptor, lo cual hace que existan efectos como el traslape en el receptor o una gran carga de ruido. Este es un fenómeno que se da en todos los radares de onda

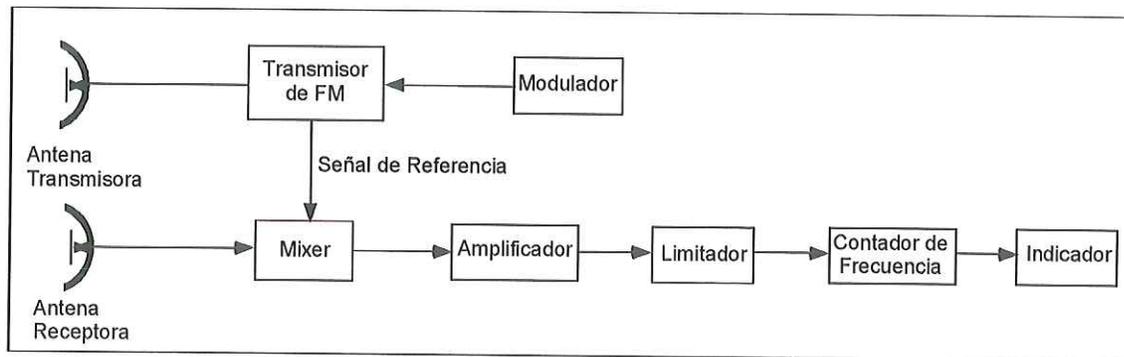


Figura 21 Diagrama básico de un radar de onda continua Doppler y frecuencia modulada.

continua ya que en ningún momento dejan de funcionar tanto el transmisor como el receptor. Existen varias configuraciones que nos permiten usar una sola antena, una es por medio de un circulator [Karode *et al.*, 1998] el cual permite el paso de la energía del transmisor hacia la antena y de la antena al receptor aislando una parte del efecto de "leakage" del transmisor. El requerimiento de un buen aislamiento entre dos antenas es reemplazado por un buen aislamiento entre los puertos del transmisor y receptor del circulator figura 22. El desempeño del circulator puede ser mejorado acoplando la señal transmitida al receptor ajustando la amplitud y fase, de tal manera que se cancele el efecto de "leakage" en el circulator, con esto se puede lograr un incremento de 20 dB en el aislamiento. Además del circulator se requiere el uso de un interruptor, este sistema haría que no se tuviera un sistema estrictamente de onda continua, pero se conservarían las propiedades de un radar FMCW, con solo una mínima degradación en su desempeño [McGregor *et al.*, 1994]. Este sistema es denominado radar de onda continua interrumpido modulado en frecuencia (CWIFM).

Tanto el espectro de frecuencias como el alcance en distancia y la potencia del transmisor que manejan este tipo de radares, son similares a los utilizados en el radar Doppler de onda contínua descrito anteriormente.

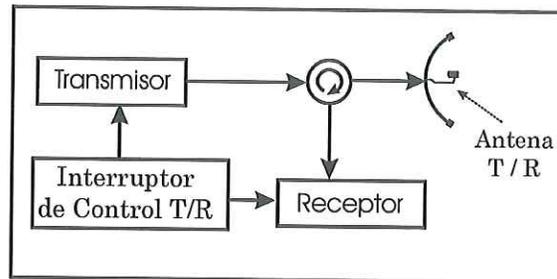


Figura 22 Diagrama a bloques, del sistema de radar de onda continua interrumpida modulado en frecuencia, utilizando un circulator.

IV DISEÑO DEL SISTEMA DE RADAR.

IV.1 *Introducción*

En el presente capítulo se hará un seguimiento de los pasos para la elección del sistema, dando por un lado los beneficios y los problemas que se tienen de acuerdo a nuestras necesidades para cada tipo de radar estudiado anteriormente; y por otro lado una descripción de las cualidades del sistema que se eligió. Además, a partir del diseño elegido, se dará un seguimiento de la función que tienen los componentes utilizados. Partiendo de un diagrama propuesto, se explicarán paso a paso los parámetros de diseño que tendrá el sistema. Esto es, los parámetros con los cuales podemos tener un punto de partida para la elección de los dispositivos reales que se encuentren en el mercado.

Uno de los puntos más delicados es precisamente la elección de los dispositivos, ya que además de cubrir las necesidades y los intervalos requeridos para el diseño propuesto, deben de ser compatibles en otros aspectos. Por ejemplo, el nivel de potencia, el intervalo de frecuencia que manejen e incluso el tipo de conectores que se utilicen. En la sección de componentes, se dará el seguimiento correspondiente incluyendo los parámetros de entrada y salida, así como la marca y el modelo de referencia que se encuentre disponible en el mercado actual.

Por último, se tendrá el cálculo de la respuesta esperada, a partir de los intervalos de diseño estudiados y los dispositivos elegidos que conformarán físicamente el sistema

de radar. Esta respuesta definirá las características que tendrá la señal transmitida sobre la superficie del mar, tales como el área iluminada, la distribución de potencia y las pérdidas.

IV.2 Elección

Una vez hecho el análisis, sobre los tipos de radares que han probado ser los mejores y más utilizados para mediciones de la superficie del mar, se puede proceder a elegir y diseñar un sistema de radar que cumpla con el mayor número de beneficios, tomando en cuenta que debe ser un diseño factible.

En este trabajo se estudiaron tres tipos de radar, el de tipo pulsado, el Doppler de onda continua y el Doppler de onda continua y frecuencia modulada. A continuación se desglosan los sistemas de radar considerados.

Radar pulsado

El radar pulsado no se tomó en consideración para el diseño debido a varios factores. En lo que respecta a investigaciones previas desarrolladas [Poulter *et al.*, 1990], se ha encontrado que los radares de tipo pulsado contienen un mayor grado de incertidumbre para realizar estudios sobre la superficie del mar y dado que las mediciones con este tipo de radares se hacen solamente a unas cuantas decenas de metros del blanco (la superficie del mar), una de las principales cualidades que tiene este radar, es la gran cantidad de potencia que pueden manejar y que les da la posibilidad de abarcar grandes distancias, queda sin efecto para el caso que nos compete. Otra problemática que tiene el radar pulsado, es que necesita un equipo mucho más especializado para lograr su

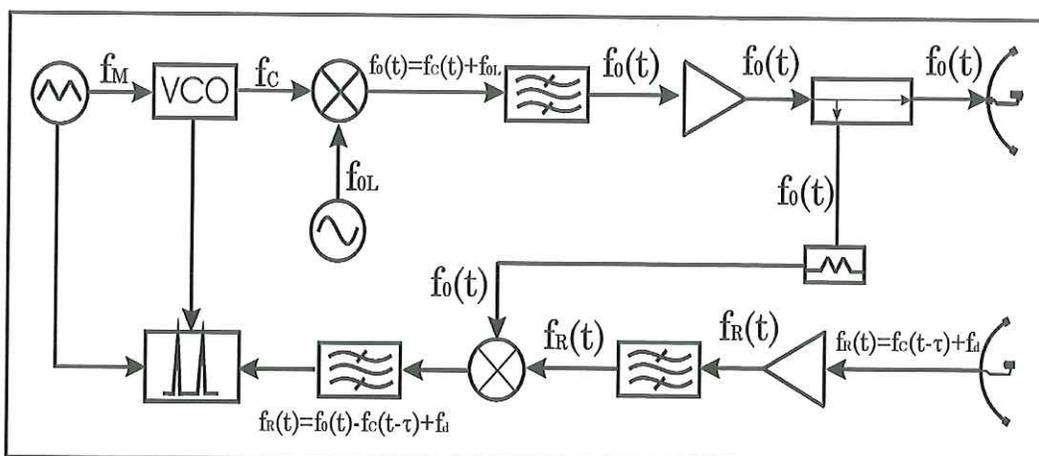


Figura 23 Diagrama a bloques del radar propuesto del tipo Doppler de onda continua y frecuencia modulada.

caracterización y diseño en laboratorio. En lo que respecta al costo de los dispositivos necesarios para su fabricación, este es muy alto, ya que la mayoría de los componentes son caros dada la potencia que manejan. Además son difíciles de adquirir en el mercado. Por último el procesamiento de la señal es más complejo, por lo que se requiere de una investigación muy extensa, involucrando el diseño de un sistema lógico para controlar la transmisión y respuesta en el radar. Esto, queda fuera de los objetivos de esta investigación.

Radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada.

En seguida abordaremos una configuración parcial del tercer radar estudiado, el radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada. Este radar dada las cualidades demostradas anteriormente [Poulter *et al.*, 1995] en el estudio de la superficie del mar, fue considerado como una opción para la realización física del sistema. En la figura 23 se muestra el esquema básico propuesto en este trabajo.

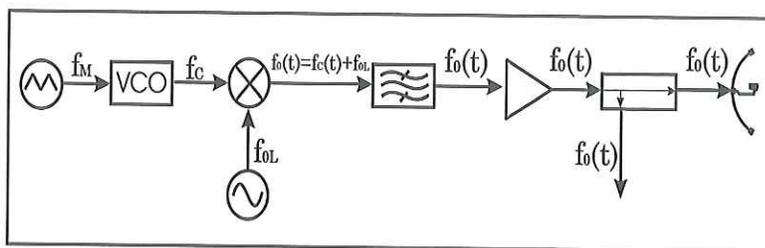


Figura 24 Diagrama a bloques de la etapa del transmisor para el radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada propuesto.

La etapa del transmisor en este sistema (figura 24) consta de un oscilador de baja frecuencia que genera la señal periódica, senoidal o triangular, que entra a un oscilador controlado por voltaje (VCO por sus siglas en ingles), La función de este dispositivo es modular la señal de baja frecuencia y, dependiendo de la amplitud de la señal entrante, genera una frecuencia directamente proporcional a la amplitud. La señal modulada en frecuencia que sale del VCO entra a un mezclador, que en conjunto con un oscilador local, genera una sucesión de señales a diferentes frecuencias o armónicas. De estas únicamente tendremos interés en la señal con frecuencia

$$f_c(t) + f_{OL}.$$

Por lo anterior, es necesaria la utilización de un filtro que discrimine la gran cantidad de armónicas que pudieran interferir de algún modo con la señal de interés en las distintas etapas del procesamiento. Una vez que la señal pasa por un filtro pasabanda muy selectivo, llega a un amplificador de altas frecuencias que eleva el nivel de potencia de la señal. Una vez amplificada, la señal entra a una antena parabólica mediante una transición de cable coaxial a guía de onda. Esto nos da la capacidad de

convertir la energía que viaja por el cable en energía que pueda ser capaz de viajar por el "espacio libre".

Antes de darle salida a la señal por la antena, se coloca un acoplador direccional que recoge una muestra de la señal de salida; la razón por la que colocamos este divisor es para lograr una señal con las mismas características a la que viajará hacia la superficie del mar, ya que una colocación previa de este dispositivo podría diferir bastante de la señal transmitida, debido a los componentes presentan características no lineales que modifican la señal.

Una vez que las ondas electromagnéticas son reflejadas por el blanco, se recoge con una segunda antena que constituye la etapa del receptor (figura 25), esta es necesaria ya que debido a que estamos hablando de un radar de onda continua, la utilización de una sola antena presentaría graves problemas en cuanto al aislamiento entre el receptor y el transmisor. Al entrar a la antena, la señal pasa de una transición de guía de onda a cable coaxial e inmediatamente a un amplificador de bajo ruido que es capaz de amplificar la baja potencia de la señal reflejada después de haber realizado el viaje de ida y vuelta. Cuando la señal tiene el suficiente nivel de potencia entra a un filtro que permitirá el paso únicamente a la componente del espectro de frecuencias que corresponde a al que se envió. Esto es debido a que el amplificador amplifica sobre un espectro de frecuencias mucho mayor al requerido. A la salida del filtro, la señal entra en un mezclador que utiliza como referencia la señal transmitida. Esta es previamente atenuada para evitar un daño físico al mezclador. La utilización de esta señal como oscilador local, nos

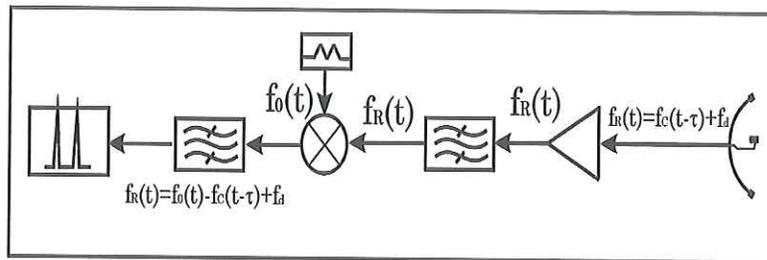


Figura 25 Diagrama a bloques de la etapa del receptor para el radar Doppler de onda continua y frecuencia modulada propuesta.

garantiza tener a la salida del mezclador únicamente la señal generada de baja frecuencia con las variaciones correspondientes debidas al efecto Doppler.

A la salida del mezclador se coloca un filtro para permitir el paso de la señal de interés, enseguida ésta entra a un sistema lógico, como pudiera ser una computadora, para realizar un muestreo de la frecuencia recibida y un procesamiento de la frecuencia Doppler. Este procesamiento es complicado ya que se pueden tener muchas variables que de no darle el procesamiento adecuado podrían causar un cierto grado error como se muestra en la figura 26. En esta figura se muestran cuatro señales diferentes, graficadas en frecuencia contra tiempo. La primera, de línea continua, corresponde a la señal transmitida de una frecuencia modulada lineal, que corresponde a una señal triangular. Tenemos una línea punteada que representa una señal reflejada ideal. Con esto queremos decir que no tenemos movimiento alguno en el blanco. Realizando una diferencia entre la frecuencia de la señal que se está transmitiendo en ese instante de tiempo y la frecuencia de la señal recibida en el mismo instante, obtenemos un valor proporcional a la distancia al blanco. Desafortunadamente, para nuestro propósito esto sería irreal en un blanco como el de la superficie del mar, que se encuentra en constante

movimiento. La realidad que tendríamos sería una frecuencia reflejada alterada por el efecto Doppler, ya sea con un corrimiento positivo o negativo; esta respuesta esta representada en la figura 26 con la línea rayada. Como se puede observar, es idéntica a la señal punteada pero con un cierto incremento en frecuencia debido al efecto Doppler. De aquí viene el principal problema de utilizar un sistema de frecuencia modulada.

Con un procesamiento convencional de la diferencia de frecuencias transmitida y recibida, obtendríamos una respuesta como la que se muestra en la segunda línea continua de la figura 26. Para cierto momento en el tiempo tenemos una diferencia en frecuencia y para otro instante, tenemos otra.

Para poder procesar una señal con estas características se utilizan técnicas de muestreo. Una manera de lograrlo es procesar digitalmente un valor equivalente a la frecuencia transmitida en un tiempo t , así como otro valor equivalente a la frecuencia de entrada en el receptor. Con estos valores se puede realizar una diferencia cada determinado lapso de tiempo para conseguir un muestreo, tomando en cuenta que la velocidad de éste debe ser menor a $\frac{1}{4}$ del período de la señal modulada, preferentemente menos de $\frac{1}{8}$. De esta manera con los valores obtenidos en por lo menos medio periodo, se realiza un promedio. El valor obtenido será proporcional a la diferencia en frecuencia de la señal modulada transmitida y recibida y, por tanto, a la distancia. Para conocer la frecuencia Doppler, se debe obtener la diferencia entre un punto del muestreo de la señal recibida y el resultado del valor promedio de la frecuencia, obteniendo la diferencia entre la frecuencia transmitida y la frecuencia recibida, siendo esta diferencia igual a la frecuencia Doppler generada.

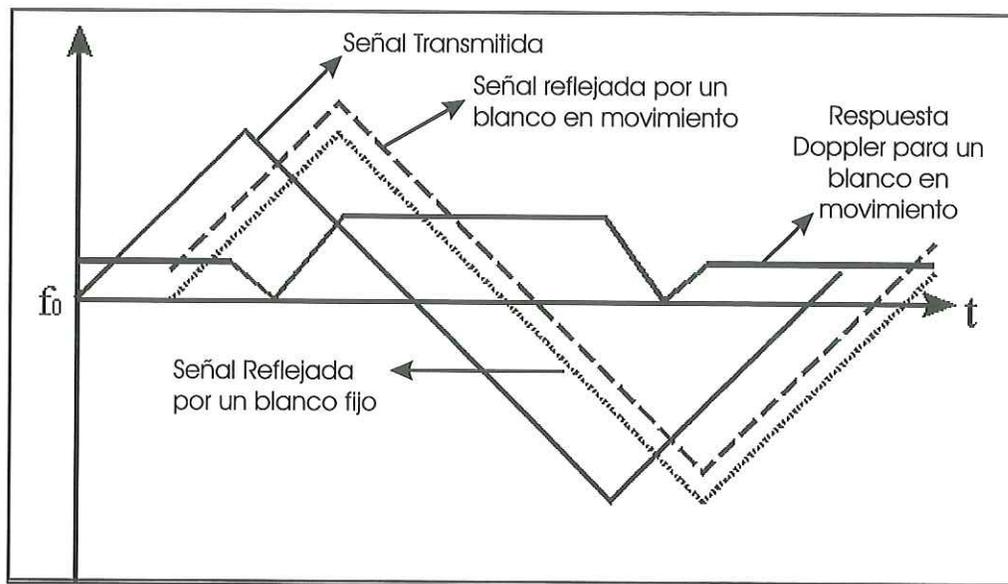


Figura 26 Factor de error, cuando se utiliza la modulación en frecuencia y se tienen blancos en movimiento.

Todo lo anterior, hace necesario contar con un complejo sistema de procesamiento digital de la señal. Dado que el procesamiento debe de realizarse en tiempo real, es necesario utilizar un sistema de adquisición de datos y un programa lógico muy preciso, lo cual queda fuera de los objetivos del diseño. Además, los gastos derivados de incluir un sistema lógico elevarían sustancialmente el costo del proyecto. Sin embargo, dado los beneficios de un sistema de radar de esta naturaleza no, se descarta como una adaptación futura al diseño que se desea proponer.

Radar Doppler de onda continua

El segundo tipo de radar estudiado, el radar Doppler de onda continua, en general tiene gran similitud con los radares anteriores en cuanto al diseño básico y parámetros que se pueden medir, sin embargo, el procesamiento de la señal resulta más simple y

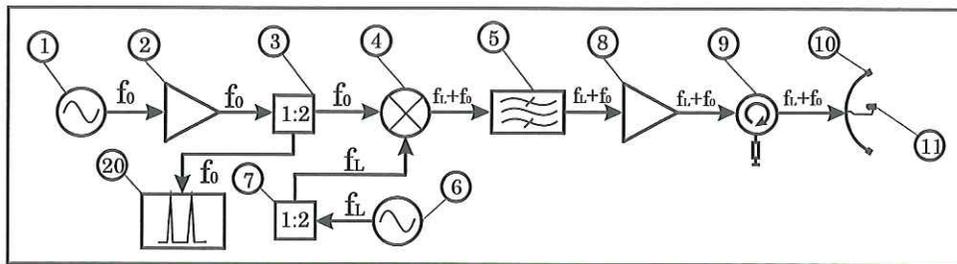


Figura 27 Diagrama a bloques de la etapa de transmisión, para el diseño final del radar Doppler de onda continua.

dado los beneficios indicados más adelante, fue seleccionado como el diseño adecuado. La configuración se eligió en función de las necesidades dadas, de las limitaciones en los recursos y de la complejidad. Esto dió como resultado un diseño sencillo y confiable.

IV.3 Configuración

Después del análisis previo se llegó a la conclusión que, dada la sencillez, la confiabilidad, el uso reducido de componentes y la posibilidad de ampliar sus características, el radar de Doppler de onda continua representa la mejor opción para el sistema que se desea diseñar.

IV.3.1 Transmisor.

La primera parte del esquema del diseño final propuesto se muestra en la figura 27 y corresponde a la etapa del transmisión. Consta primeramente de un oscilador de baja frecuencia (1), el cual genera una señal senoidal. Esta entra a un amplificador (2), pues se requiere de un cierto nivel de potencia para cubrir las pérdidas que tendrá

en los dispositivos subsecuentes. Por medio de un divisor de potencia (3), la señal se distribuye en dos partes iguales denotadas como f_0 . Una parte entra a un bloque de procesamiento (20) y la otra continúa hacia un mezclador (4). Además, se tiene un oscilador local (6) de alta frecuencia f_L , y un divisor de potencia (7), para obtener la misma señal por dos canales.

Una vez que se une la señal del oscilador de baja frecuencia (1) con la señal de alta frecuencia del oscilador local (6), se genera una nueva señal con frecuencia equivalente a $f_0 + f_L$. Dado que el mezclador generara un gran numero de señales a distintas frecuencias, se requiere la utilización de un filtro pasabanda (5) que tenga la capacidad de seleccionar únicamente la componente del espectro deseada. Enseguida, la señal entra a un amplificador (8), da a la señal el nivel de potencia que requiere para viajar por la atmósfera una cierta distancia.

Cuando la señal tiene el nivel de potencia deseado, pasa por un circulador (9) que protege de distorsiones o daños al amplificador (8). Después la señal entra a una transición (11) de cable coaxial a guía de onda, que empata la impedancia del cable con la impedancia de la atmósfera, evitando reflexiones. La antena que se utiliza es parabólica (10), la cual permite generar dar un haz de iluminación con baja divergencia, para de esta manera optimizar la ganancia de transmisión.

IV.3.2 Receptor.

Una vez que la señal ha viajado en su camino hacia el blanco, de ida y vuelta, es recibida por una segunda antena parabólica (13). Esta concentra la potencia de la onda electromagnética recibida en el foco, donde se encuentra una transición (12) de

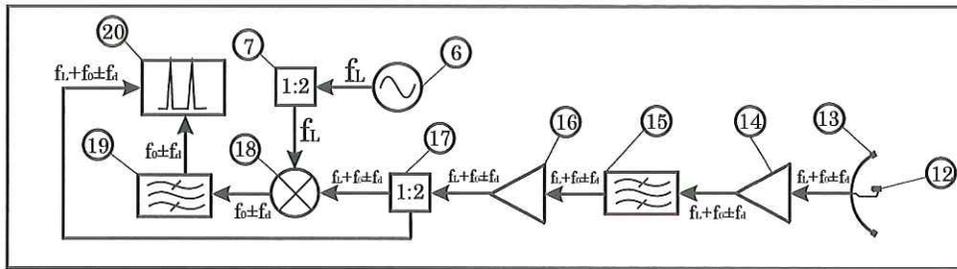


Figura 28 Diagrama a bloques de la etapa de recepción, para el diseño final del radar Doppler de onda continua.

guía de onda a cable coaxial. Inmediatamente después, entra a un amplificador de bajo ruido (14), que eleva la potencia de la señal recibida a un nivel suficientemente alto para ser procesada. Una vez que la señal ha salido del amplificador (14), entra a un filtro pasabanda (15). Dado el gran ancho de banda que usualmente manejan los amplificadores de bajo ruido, se debe seleccionar solo la parte del espectro de interés para evitar posibles interferencias en el momento de procesar la señal. La frecuencia recibida será

$$f_R = f_0 + f_L \pm f_d. \quad (49)$$

Esta señal como se puede observar, tiene la misma frecuencia que se tuvo a la salida del transmisor, pero con una variación en frecuencia. Esto debido al efecto Doppler causado por el movimiento del blanco.

Enseguida la señal f_R entra a un amplificador de baja potencia (16) para darle a la señal el nivel necesario para recuperar las pérdidas del filtro (15) y compensar las futuras pérdidas. Después, f_R se divide en dos señales de idéntica frecuencia mediante un divisor de potencia (17). Una de las cuales va directo a el bloque de procesamiento (20) de la señal y la otra va un mezclador (18), que realiza la diferencia entre la señal

entrante al radar y la que proviene de la segunda salida del oscilador local de alta frecuencia (6). De esta manera podemos extraer una señal equivalente a

$$f_0 \pm f_d,$$

la cual es la señal de oscilador de baja frecuencia (1), más menos la frecuencia Doppler generada por el blanco en movimiento. Es necesario considerar que la señal f_0 es mayor que la frecuencia Doppler generada por el blanco. Por último la señal pasa nuevamente por un filtro pasabanda (19) para seleccionar solamente la parte del espectro de interés, para ser enviada al bloque de procesamiento (20) de la señal.

IV.3.3 Sistema completo.

En la figura 29, se muestra el diagrama a bloques completo del diseño final para el sistema de radar propuesto, se puede observar el seguimiento total en el comportamiento de la frecuencia. Los bloques de transmisión y recepción están relacionados, por un lado por la señal del oscilador de alta frecuencia (6), y por otro en el módulo de procesamiento de la señal.

La función de cada dispositivo utilizado en el radar y su forma, de elección, se detallarán más adelante. Sin embargo, para tener un referencia mas clara y rápida podemos observar la tabla II, esta nos da una visión de los componentes utilizados en cada parte del sistema de radar donde se incluye el nombre y modelo de cada dispositivo sin contar sus características y parámetros propios.

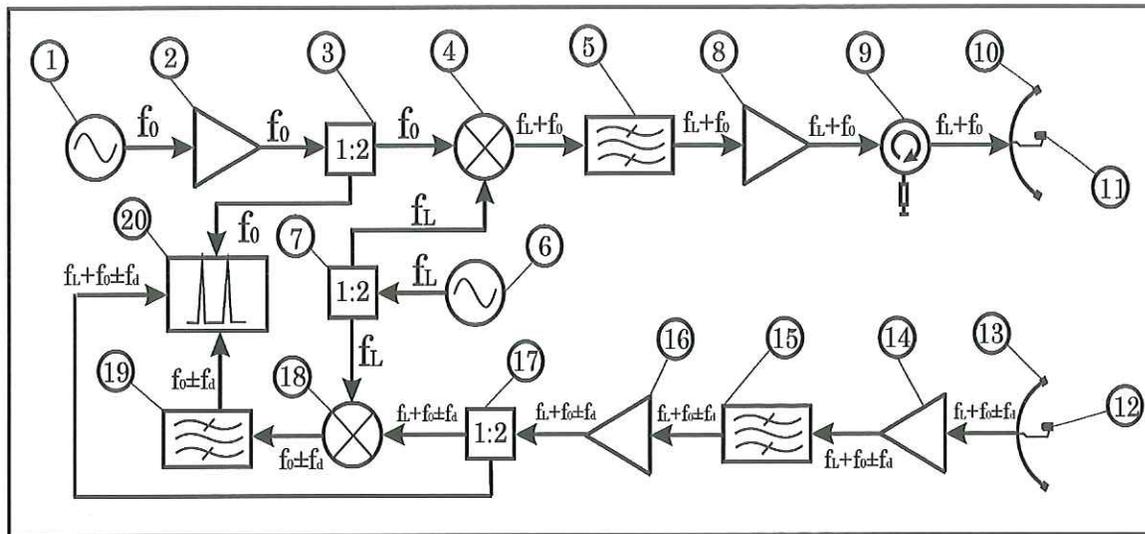


Figura 29 Diseño a bloques del Radar Doppler de onda continua propuesto.

IV.3.4 Módulo de procesamiento de la señal

Ahora bien, tenemos el modulo donde la señal será procesada para obtener los datos resultantes, aunque en la actualidad se puede ver prácticamente una cantidad ilimitada de opciones que pudieran realizar un trabajo, se eligió la que puede ser construida bajo las restricciones antes mencionadas en cuanto a complejidad, disponibilidad de componentes y sobre todo costo.

En la figura 30, se tiene el diagrama a bloques de la etapa de procesamiento para el diseño elegido en la construcción del radar. Se puede ver en primer término a la señal proveniente del oscilador de baja frecuencia, esta entra a un dispositivo en este caso un circuito integrado, el cual tiene la función de un demodulador de frecuencia (1), del cuál obtenemos un voltaje directamente proporcional a la frecuencia de la señal de entrada, por otro lado podemos ver la entrada de la señal recibida por el radar y procesada por el mezclador, la cual entra igualmente a otro dispositivo demodulador (6) que entrega una

Tabla II Relación de componentes, para el diagrama de bloques del radar Doppler propuesto.

Componente	Descripción
(1)	Oscilador de baja frecuencia , INTERSIL, modelo ICL8038
(2) , (3) , (19)	Amplificador operacional de presicion ANALOG DEVICES, Modelo OP-10
(4)	Mezclador MITEQ SSB UpConverter, modelo SDM0204LC1MD
(5) , (15)	Filtro LARK ENGINEERING CO., modelo 283650-300-3AA
(6)	Oscilador de alta frecuencia, EMF modelo 512014 Serie 500
(7) , (17)	Divisor de potencia MINI-CIRCUITS modelo ZFSC-2-10G
(8)	Amplificador MINI-CIRCUITS, modelo ZVE-8G
(9)	Circulador DITOM MICROWAVE, modelo D3C2040
(10) , (13)	Parabola de 2 metros de diámetro.
(11) , (12)	Alimentador polarotor CHAPARRAL, modelo PR-1E
(14)	Amplificador de bajo ruido, MICROWAVE DB, modelo C020040D-4B1
(16)	Amplificador MINI-CIRCUITS, modelo ZRON-8G
(18)	Mezclador MARKI MICROWAVE, modelo M1-0204
(20)	Modulo de procesamiento de la señal

diferencia de potencial directamente proporcional a la frecuencia. El voltaje proveniente del primer dispositivo (1) $V(f_0)$, se hace pasar por un inversor (5) para obtener $-V(f_0)$ y junto con el voltaje proveniente del demodulador (6) $V(f_0 \pm f_d)$, entrar a un sumador (2), el cual realizará una diferencia de los dos voltajes, extrayendo una diferencia de potencial equivalente a $V(f_0)$ y dejando un voltaje que será directamente proporcional a la frecuencia Doppler

$$V_d = V(f_0 \pm f_d) - V(f_0).$$

El voltaje procesado por un dispositivo (3) que convierte las señales analógicas en digitales, dando un valor binario proporcional a la diferencia de potencial, y de esta manera pueden ser procesada por una computadora (4), en donde los valores binarios recibidos serán proporcionales a la frecuencia Doppler, la cual a su vez se relaciona con la velocidad del blanco.

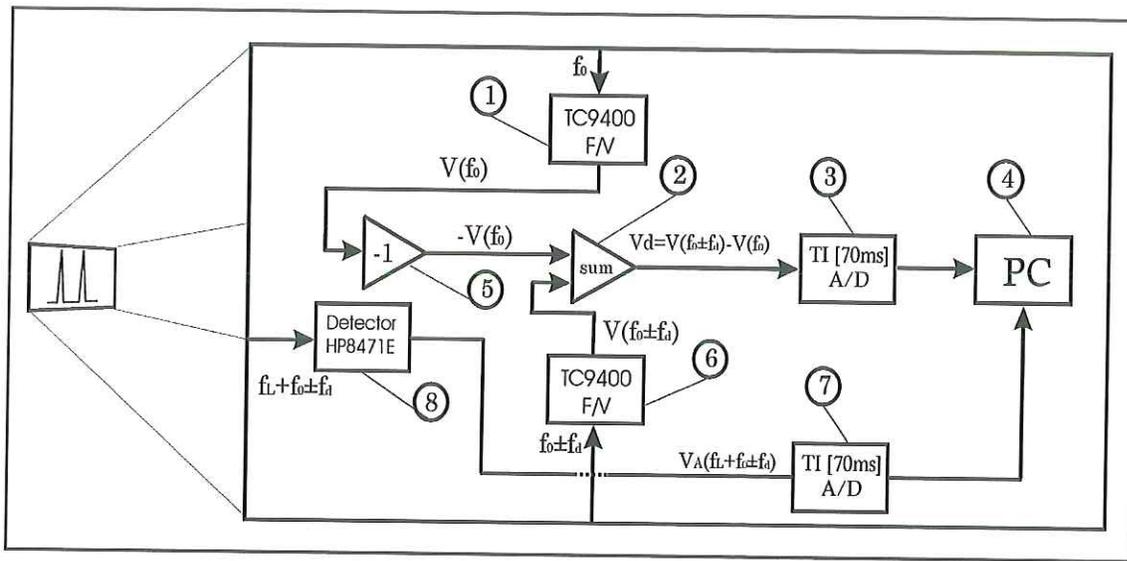


Figura 30 Módulo de procesamiento de la señal para el radar Doppler de onda continua.

Por otro lado, observamos una señal de entrada la cual fue extraída a la salida del amplificador de bajo ruido y el filtro, y es procesada en un detector (8), este realiza una integral sobre un cierto ancho de banda, y transforma la potencia de todo este espectro en un valor de voltaje que es proporcional a la ganancia de entrada en el radar. Esta es procesada por un dispositivo (7) que es convertidor analógico digital para poderla dirigir a una computadora (5). El valor que obtendremos será equivalente a la potencia recibida, la cual es muy útil en el estudio del comportamiento de las ondas electromagnéticas y la superficie del mar, ya que dependiendo de las características que presente el agua de mar como la cantidad de partículas que contenga en ese momento o el movimiento que exista en la superficie por el viento, se tendrán respuestas en ganancia diferentes, lo cual es fundamental en este tipo de estudios.

Tabla III Relación de componentes, para el diagrama de bloques del módulo de procesamiento de la señal.

Componente	Descripción
(1) , (6)	Demodulador TELCOM TC9400
(2) , (5)	Amplificador operacional de precisión ANALOG DEVICES, modelo OP-10
(3) , (7)	Convertidor A/D , de dos canales TEXAS INSTRUMENTS
(4)	Computadora personal
(6)	Oscilador de alta Frecuencia, EMF modelo 512014 serie 500
(8)	Detector HP, modelo 8471E

En la tabla III, como se hizo anteriormente, se muestran para una visión rápida el nombre y modelo de cada dispositivo utilizado y elegido en el diseño de esta parte del sistema de radar, sin dar detalles sobre la forma de elección ni de los parámetros propios de los componentes, ya que estos se verán mas adelante con detenimiento.

IV.4 Variables de diseño.

Cuando hablamos de variables de diseño, nos referimos a los parámetros obtenidos de la respuesta del radar y su dependencia con los componentes así como sus características propias. Con esto nos referimos a poder elegir un rango de frecuencias, una ganancia o una cierta localización. Además, debemos de tener claro que repercusiones tendrá esto en el desempeño y respuesta del radar.

Debemos tomar en cuenta primeramente un análisis del comportamiento de una antena parabólica en su función como transmisor, que en nuestro caso es el punto de partida en la elección de los componentes a utilizar. La respuesta que presente el radar, dependerá directamente de los componentes elegidos y sus características, como ganancia y frecuencia. En una aplicación como la que se busca, donde se requieren

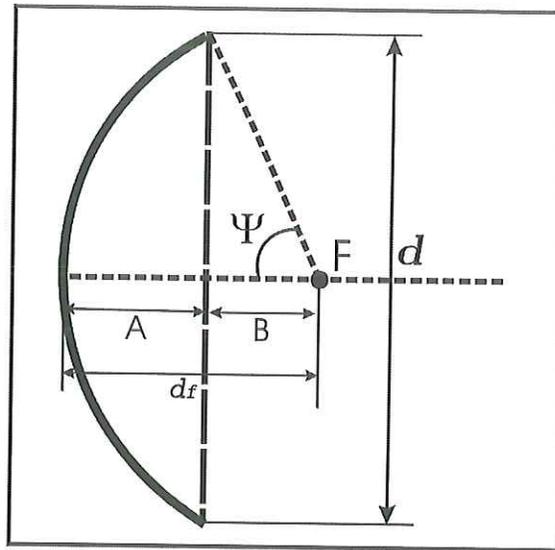


Figura 31 Parámetros de diseño físico en un paraboloides de revolución.

hacer estudios sobre la superficie del mar, se quiere en la mayoría de los casos, tener un haz de iluminación lo mas pequeño posible, de tal manera que se tenga un mayor control de la zona a estudiar. Para esto se deben tener en consideración los rangos de diseño en cuanto a respuesta en ganancia, frecuencia de operación, dimensiones de la antena y distancia al blanco. A continuación daremos el análisis previo del funcionamiento de la antena y la relación con los parámetros externos que dependen de los componentes.

La antena parabólica forma parte de un grupo que funciona apoyándose en un reflector para conseguir una gran ganancia directiva, gran ancho de banda y un gran rendimiento. Las dos partes primordiales de una antena parabólica son el espejo y el excitador. El espejo puede ser de varias formas: un paraboloides de revolución, un sector del mismo, un cilindro parabólico o un segmento del mismo limitado por dos planos conductores paralelos. El más simple y de mayor uso, es el paraboloides de revolución (figura 31) el cual cuenta con los siguientes parámetros a considerar:

-Abertura [d].- Es el valor del diámetro de la circunferencia formada por los bordes de la parábola.

-Angulo de abertura [Ψ].- Es el valor del ángulo formado por la línea focal y la que une el punto focal con el borde de la parábola.

-Distancia focal [d_f].-Es el valor de la línea que une el vértice de la parábola con el punto focal.

-Factor de efectividad [γ].- Es una constante a aplicar y es función de la perfección constructiva de la parábola este tiene valores mínimos de 0.5 y máximos de 0.8 para la mayoría de las antenas.

-Ganancia [G].-La ganancia propia de la antena.

Para el cálculo de los parámetros de una antena parabólica, a partir de estructura de la figura 31, podemos encontrar el diámetro mínimo necesario mediante

$$d = \lambda \sqrt{\frac{G}{5\pi}} \text{ para } \gamma \rightarrow 0.5. \quad (50)$$

La expresión que describe la distancia focal es

$$d_f = \frac{d}{4 \tan\left(\frac{\Psi}{2}\right)}. \quad (51)$$

Si consideramos un campo magnético uniforme es recomendable fijar un ángulo Ψ para la antena de 62° [García, 1992]. Ahora para calcular las dimensiones en A y B tenemos

$$B = \frac{d}{2} \tan(90 - \Psi)^\circ, \quad (52)$$

$$A = \frac{d}{4 \tan\left(\frac{\Psi}{2}\right)} - \frac{d}{2} \tan(90 - \Psi)^\circ. \quad (53)$$

La Ganancia para el común de las antenas en valores absolutos está relacionada con el factor de efectividad F_E , que para la mayoría de las antenas se encuentra entre 0.6 y 0.8. Para efectos de cálculo se toma el valor de 0.6 y dar un margen de seguridad en el error final [García, 1992]

$$G = F_E \frac{S}{\lambda^2}, \quad (54)$$

donde S es la superficie total del plato siendo:

$$S = \pi \frac{d^2}{4}. \quad (55)$$

En el cálculo del ancho del diagrama de directividad (figura 33), se toma el ancho en el plano vertical

$$2\theta_E = \left(75 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ. \quad (56)$$

Y en el plano horizontal se tiene

$$2\theta_H = \left(70 \frac{\lambda}{d}\right)^\circ. \quad (57)$$

El excitador tiene una gran importancia por su influencia en las características generales del sistema. Este debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Tener un diagrama de radiación tal que se pierda la mínima energía fuera de los bordes del espejo.

- Las dimensiones transversales deben ser mínimas, para perturbar lo menos posible el campo reflejado del espejo.

- El ancho de banda debe ser suficiente para cubrir la banda de trabajo de la antena.

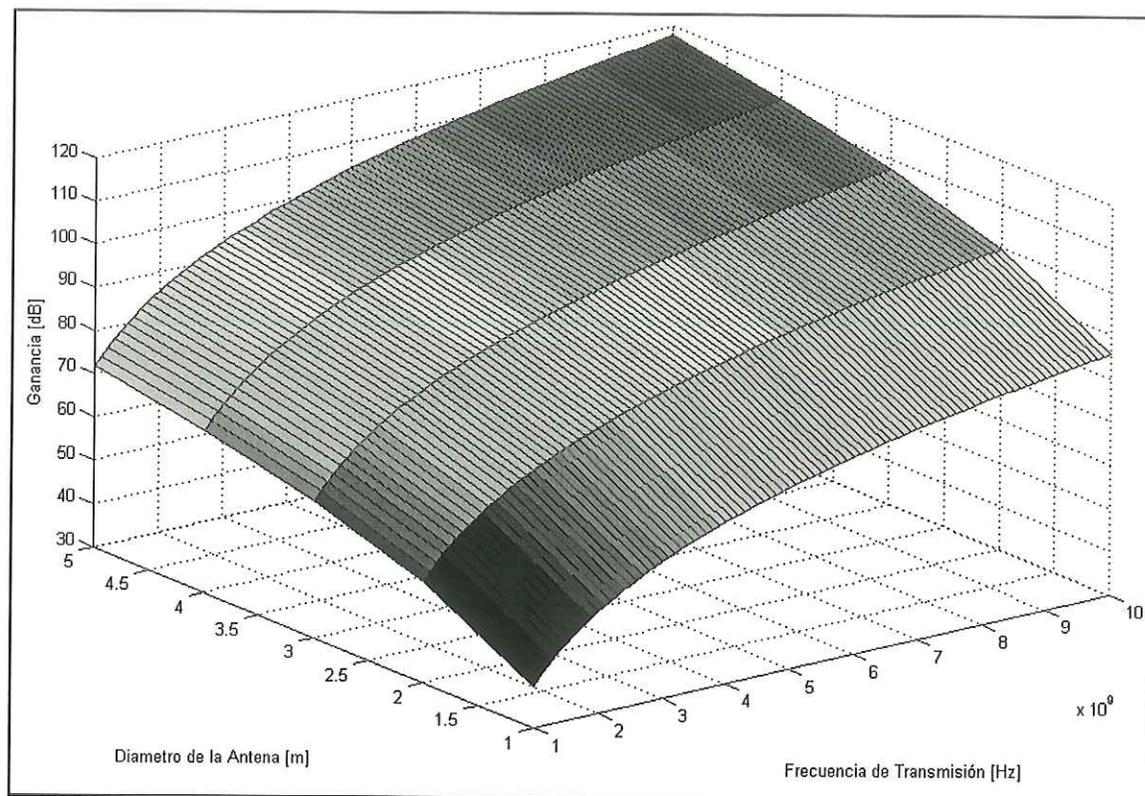


Figura 32 Relación de la ganancia, el diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión de la misma.

-Debe ser lo menos posible vulnerable a los efectos meteorológicos.

La figura 32 muestra la relación que tenemos entre la frecuencia de transmisión, el diámetro de la antena y ganancia de la misma.

Para fines prácticos, se puede considerar el haz de iluminación de la antena con dos ángulos, vertical y horizontal (figura 33). En las figuras 34 y 35 se ilustra la frecuencia de transmisión el diámetro de la antena y su relación con el ángulo horizontal y vertical de la pirámide de iluminación.

La figura 36 presenta la relación entre la distancia al blanco, la frecuencia de transmisión y el área de iluminación.

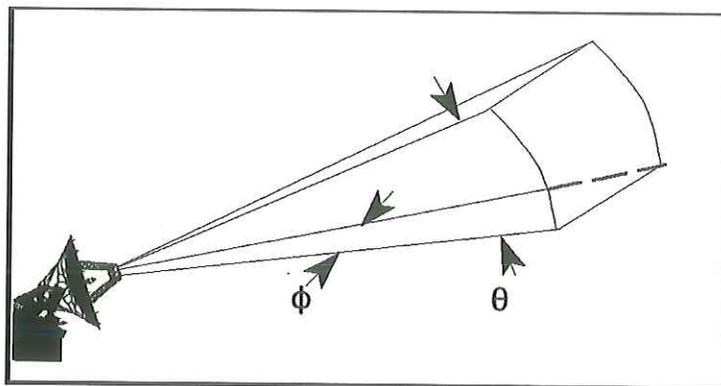


Figura 33 Ángulos horizontal y vertical en el haz de iluminación de la antena direccional.

IV.5 Componentes

Ahora bien, una vez propuesto un diseño seguro y sencillo del radar, debemos elegir los componentes con los cuales podamos realizar una construcción física y por supuesto viable del mismo. Elegir los componentes requiere de la unión de varios factores, costo, disponibilidad, complejidad y por supuesto que se adecuen a nuestras necesidades de diseño y objetivos.

Antes de elegir los componentes se deben tener muy claro cuales son los beneficios de usar uno u otro dispositivo, para esto se tienen que relacionar los parámetros más importantes que definen su uso con las respuestas que nosotros queremos obtener de un blanco como la superficie del mar. En el capítulo II, cuando se habló de los parámetros del radar y la superficie del mar, se dieron unas relaciones gráficas, primeramente sobre las velocidades que las olas de mayor longitud en la zona costera, las cuales no superaron los 6 m/s. Además se obtuvo otra gráfica en la cual se relacionó la frecuencia Doppler con la velocidad, para nuestro caso la de las olas del mar y la frecuencia de transmisión.

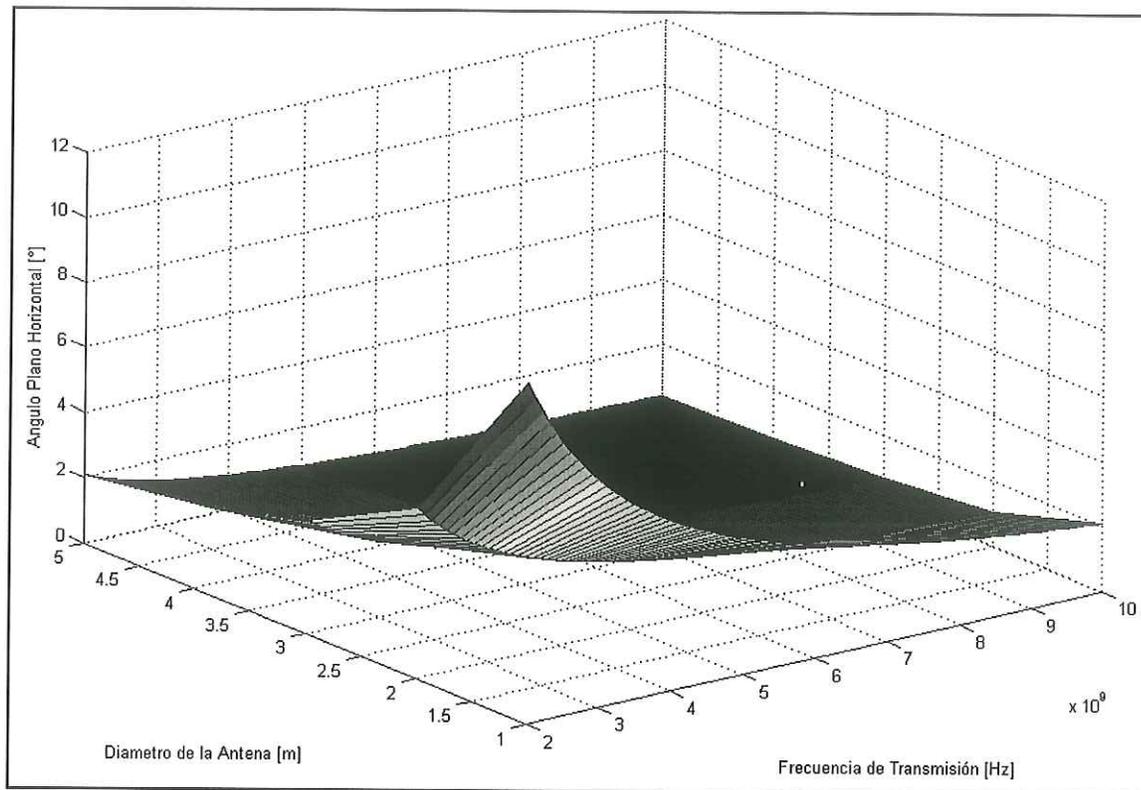


Figura 34 Relación del ángulo horizontal del haz de iluminación con el diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión.

Como se vio en esa gráfica, la frecuencia Doppler es directamente proporcional a la velocidad y a la frecuencia de transmisión.

De esta manera observando, los rangos que tendrá la frecuencia Doppler a partir de la gráfica de la figura 13, se tiene que para el caso extremo de que se utilice una frecuencia de transmisión de 10 GHz y se tengan velocidades de 6 m/s, la frecuencia Doppler generada no supera los 400 Hz, lo cual es una variación muy pequeña, que hace difícil su detección. En este término, podemos decir que entre mas alta sea frecuencia de transmisión que utilizemos tendremos una respuesta de frecuencia Doppler que podremos manejar mas fácilmente en el procesamiento de la señal.

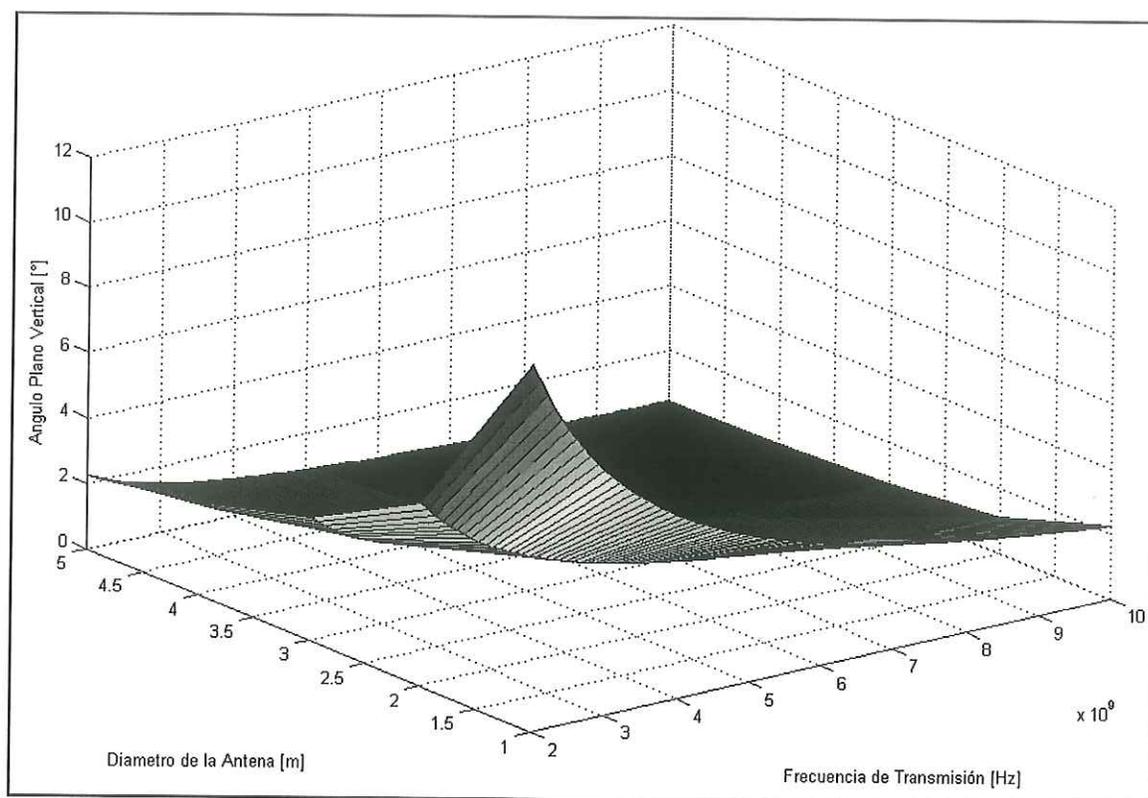


Figura 35 Relación del ángulo vertical del haz de iluminación con el diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión.

Basados en lo anterior, tenemos una base inicial para elegir los componentes necesarios para la construcción del radar. En la figura 37, se puede ver la nomenclatura asignada al espectro de frecuencias.

En la figura 38, podemos ver la asignación general de uso que tiene el espectro de frecuencias. Esta es la primera etapa para elegir la frecuencia de transmisión que elegiremos para el radar, ya que esta debe encontrarse dentro de un intervalo permitido por los acuerdos internacionales sobre el uso de frecuencias.

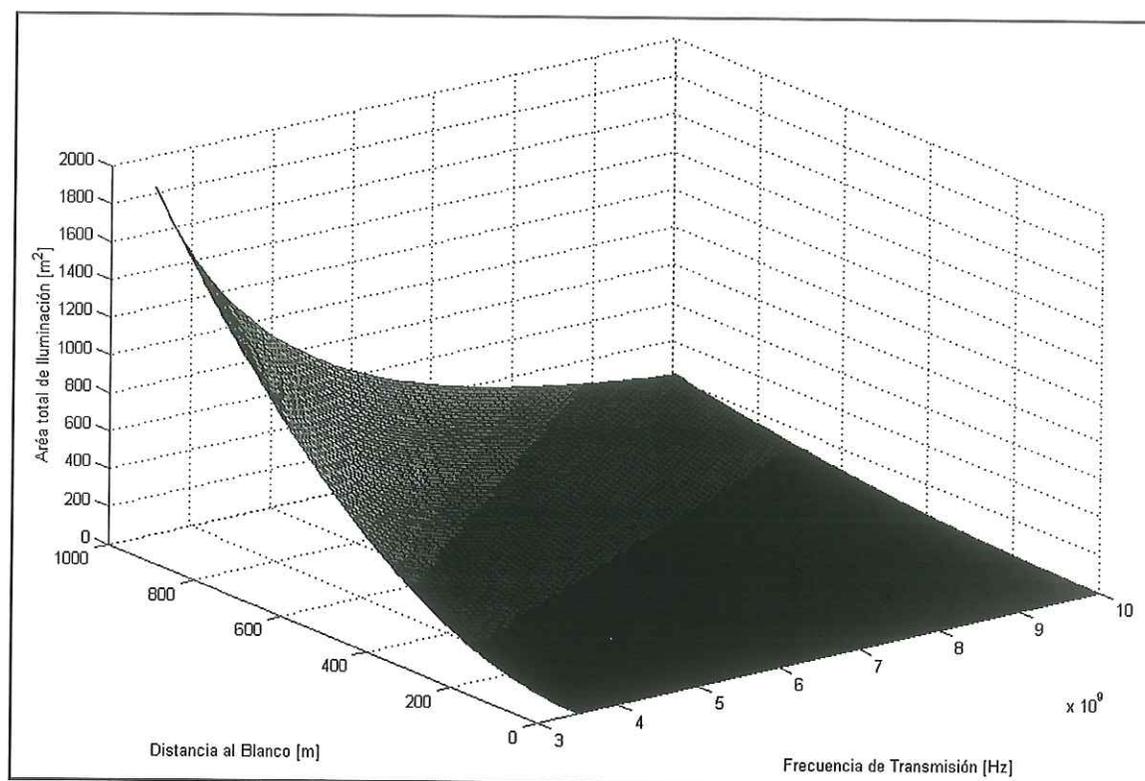


Figura 36 Relación entre el área de iluminación sobre la superficie del mar, la distancia al blanco y la frecuencia de transmisión del radar.

Algo que hay que tomar en consideración es que entre mayor frecuencia de operación utilizemos el precio de los componentes será mucho mayor. A continuación se verán los componentes elegidos en todo el sistema.

IV.5.1 Osciladores

Un oscilador de microondas es un dispositivo el cual convierte la energía de una fuente de poder en oscilación de microondas. Los parámetros eléctricos básicos de un oscilador son, nivel de potencia, eficiencia, frecuencia de operación, rango de sintonía, estabilidad

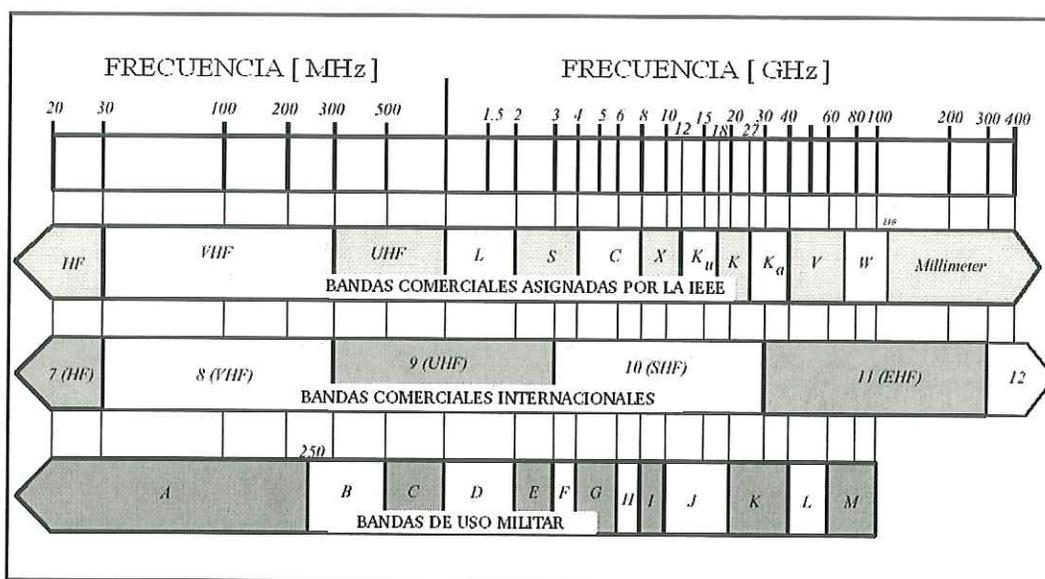


Figura 37 Nomenclatura en el espectro de frecuencias.

en frecuencia y en potencia de salida, nivel de ruido cercano a la portadora y espectro de frecuencia.

Los osciladores son clasificados de acuerdo a su a su propósito, tipo de componentes activos, valor de parámetros (potencia, frecuencia, rango, etc.).

En términos de los componentes activos, los osciladores son divididos en dos grandes categorías: Semiconductores y osciladores de tubo. Tabla IV.

Los osciladores de baja potencia (rangos de miliwatts) solo incluyen comúnmente el klystron, los osciladores de diodos tunnel y los osciladores con transistores de baja potencia. En aplicaciones de radares de alta potencia, del orden de megawatts, se utilizan osciladores de magnetrones, backward wave tubes, amplitron y gyrotrons los cuales se han distinguido por su alta frecuencia, arriba de 100 GHz [Lapatine, 1994].

Los parámetros a considerar en la elección de un oscilador son los siguientes:

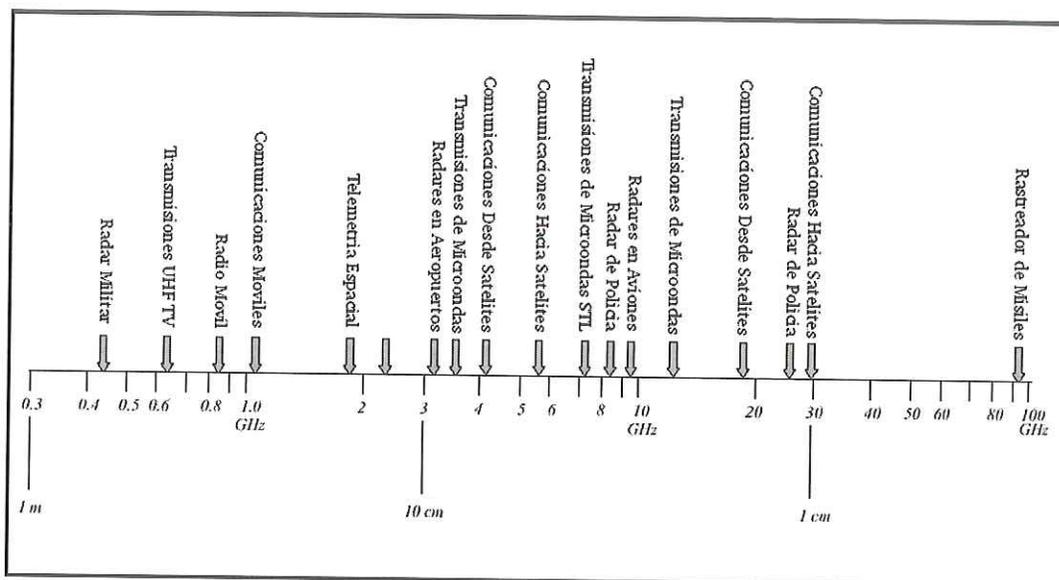


Figura 38 Uso general establecido para el espectro de microondas.

-*Frecuencia de oscilación:* Es la frecuencia a la cual se genera la señal del oscilador.

-*Potencia de salida:* Es la potencia en dBm que se obtiene a la salida del oscilador.

-*Estabilidad en frecuencia:* Esta comprende principalmente tres parámetros:

a. Temperatura: Referente a que tanto varia la frecuencia en relación a las variaciones de temperatura que se registren en el oscilador.

b. Cambios en ROE (Pulling) :Que tanto varia la frecuencia al variar la impedancia de salida.

c. Cambios en Voltaje (Pushing) : La variación que se tiene en la frecuencia, cuando se esta variando el voltaje de alimentación.

Tabla IV Clasificación de osciladores de microondas de acuerdo al tipo de componentes activos que los componen.

Tubo	Semiconductor
klystron	gunn diode
magnetron	avalanche transit-time diode
amplitron	bipolar transistor
backward-wave tube	field-effect transistor
traveling-wave tube	
gyrotron	
grid-control tube	

Oscilador de baja frecuencia

En la parte de baja frecuencia, se busco un oscilador tal que pudiera lograrse una modulación y una demodulación que pueda obtener la frecuencia Doppler fácilmente. El oscilador elegido que cumplía con estas características es un oscilador de precisión con múltiples funciones y un rango desde 1 hasta 100 kHz, perteneciente a la marca INTERSIL modelo ICL8038, el cual es ideal para ser utilizado con los circuitos integrados demoduladores y amplificadores operacionales. Para la selección de este oscilador, previamente se hizo un estudio que involucro a la gran mayoría de los osciladores que fueran compatibles con sistemas que tuvieran la capacidad de convertir la frecuencia a voltaje con precisión y manejaran rangos bajos de frecuencia ya que de esto dependerá la resolución en la frecuencia Doppler. La configuración que se eligió en este diseño figura 39, genera una señal con una frecuencia de 55 kHz y una potencia de salida de 9 dBm, la cual entra directamente a un amplificador operacional.

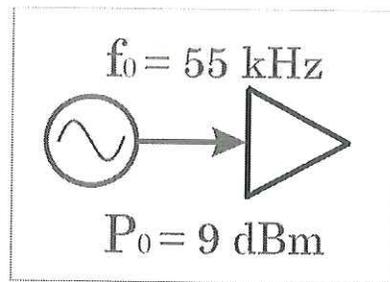


Figura 39 Parámetros de salida en la señal del oscilador de baja frecuencia.

Oscilador de alta frecuencia

Para el oscilador de alta frecuencia se eligió un oscilador dielectrico modelo EMF Serie 500, con una frecuencia central de 3.65 GHz , se escogió este debido a que su frecuencia de operación esta en la frontera entre la banda S y la C, lo cuál por una parte tiene la ventaja de que al no ser una frecuencia tan alta, el costo de los componentes subsecuentes a este no será tan alto y la otra es que al estar en la frontera antes mencionada, se pueden utilizar en general, tanto dispositivos diseñados para la banda S como la C, lo cuál nos da un margen mucho mayor de posibilidades en el mercado. En el diseño, este oscilador generara una señal de 3.65 GHz con una potencia de salida de 10 dBm la cual entrara a un divisor de potencia, para la siguiente fase del sistema figura 40.

IV.5.2 Mezcladores

El mezclador se puede definir como "un dispositivo en el cual entra una señal modulada junto con una señal proveniente comúnmente de un oscilador local para producir una señal de frecuencia intermedia" [Valey, 1987].

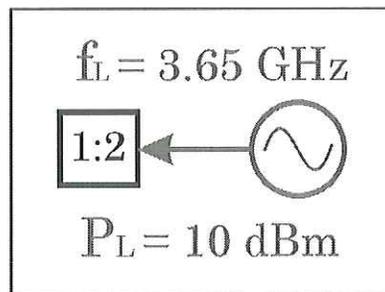


Figura 40 Parámetros de salida en la señal del oscilador de alta frecuencia.

Entre los parámetros mas importantes que se utilizan en la elección de los mezcladores son los siguientes:

-*Perdidas por conversión:* Se define como la relación de la potencia a la salida con respecto a la potencia de la señal de entrada. Esta es estrictamente dependiente de las características del dispositivo.

-*Aislamiento entre puertos:* Se mide en dB y se especifica en un ancho de banda a diferentes potencias del oscilador local. Los aislamientos de LO-RF y de LO-IF son los de mayor consideración ya que la potencia del oscilador local al presentarse a la entrada y la salida del mezclador produce niveles espurios los cuales son indeseables.

-*Productos de intermodulación:* Es una medida de la distorsión que se produce al mezclarse dos señales. Cuando una frecuencia fija se aplica al puerto de RF se producen productos de intermodulación de la forma $(\omega_{LO} \mp \omega_{RF})$ conocidos como productos de intermodulación de un tono. Si se aplican dos señales simultáneamente aparecen productos de mayor orden. El producto de intermodulación de tercer orden es la mas importante y es de la forma $\omega_{LO} \mp (2\omega_{RF_1} + \omega_{RF_2})$ conocido también como punto de intercepción de tercer orden.

-*El intervalo dinámico*: En el mezclador representa los límites de potencia sobre los cuales el dispositivo puede ser utilizado. El límite superior es el nivel de saturación a la salida del mezclador y el límite inferior representa el ruido de fondo del mezclador asociado a su factor de ruido.

-*Relación de onda estacionaria VSWR*: Es la medida de desacoplamiento en los puertos de entrada y salida del mezclador.

Up-Converter

Para el primer mezclador utilizado en el diseño se requirió de un *Up-Converter*, esto es referente a un mezclador que tiene las características de diseño para elevar la frecuencia de una señal de baja frecuencia modulándola en una señal portadora de alta frecuencia. Esto es poco común ya que en el mercado prácticamente todos los mezcladores están diseñados para la función inversa, a partir de una señal de RF y un oscilador local, obtener una señal de baja frecuencia IF. Después de un estudio en el mercado se optó por un *Up-Converter* de la empresa MITEQ de fabricación especial serie "Single-SideBand (SSB) Upconvertes", estos mezcladores requieren que por lo menos una de las frecuencias de entrada tenga la suficiente potencia para encender los semiconductores usados en el diseño interno como son los diodos Schottky arriba de 8 dBm. Estos emplean un mezclador interno de 90° para dar a la salida una banda de frecuencias, que esta en un valor sobre o debajo de el oscilador local. Se eligió este mezclador ya que fue el único en el mercado que tuviera el diseño necesario para trabajar como un *Up-Converter* sin necesidad de hacer un preciso filtrado y una amplificación previa del componente buscado en la frecuencia intermedia generada.

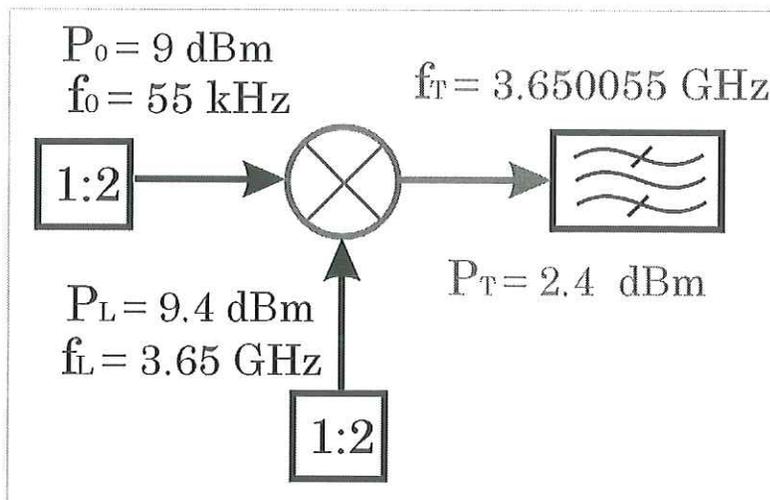


Figura 41 Etapa del mezclador *Up-Converter* y sus parámetros de entrada y salida.

En la figura 41 se ilustran los parámetros de entrada y salida que tendrá este mezclador en el sistema, se puede observar que tiene dos entradas provenientes de un divisor de potencia, una trae consigo la señal de alta frecuencia mientras que la otra la señal de baja frecuencia. La potencia de salida está referenciada a la potencia de la señal proveniente del oscilador de alta frecuencia, y las pérdidas por conversión dentro de este dispositivo no superan los 7 dB.

Down-Converter

El segundo mezclador utilizando en la etapa de recepción es un *Down-Converter*, esto referente a que tiene la capacidad de, a partir de una señal de alta frecuencia "RF", descomponerla restando la señal portadora proveniente de un oscilador local y dando como salida la señal modulada llamada de frecuencia intermedia "IF". El mezclador elegido en esta etapa es uno doblemente balanceado lo que logra un mejor desempeño, este es producido por MARKI MICROWAVE ,modelo M1-204, el cual trabaja en un

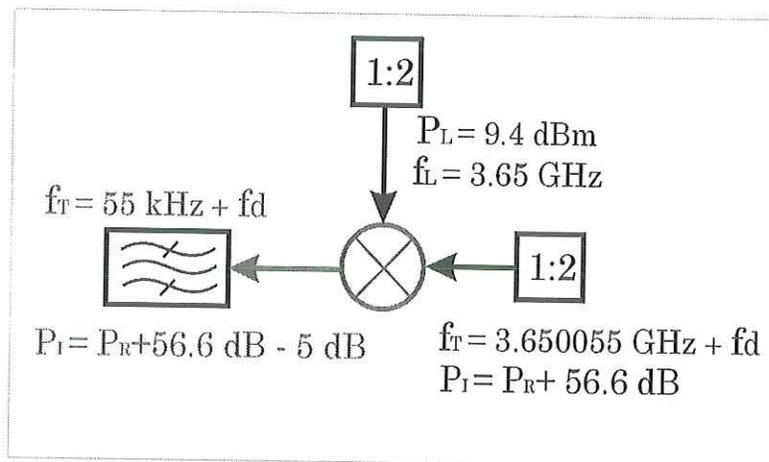


Figura 42 Parámetros de entrada y salida para el mezclador *Down-Converter*.

rango de frecuencias de 2 a 4 GHz, y se garantiza una frecuencia intermedia de DC hasta 1500 MHz, lo cual es ideal para trabajar con el oscilador de baja frecuencia y manejar rangos de variación de una frecuencia Doppler muy bajos. En la figura 42 se observan los parámetros de entrada del mezclador, podemos ver que a la salida tenemos pérdidas por inserción de 5 dB, lo cual nos da una potencia igual a la potencia recibida mas 33.6 dB y una frecuencia resultante igual a 55 kHz, mas menos la variación de frecuencia Doppler resultante.

IV.5.3 Filtros

Un filtro es un circuito o un sistema que tiene la capacidad de seleccionar un cierto rango de frecuencias a lo largo de un cierto ancho de banda. Entre la enorme cantidad de filtros que pueden existen, los filtros mas comunes utilizados en el rango de las microondas son:

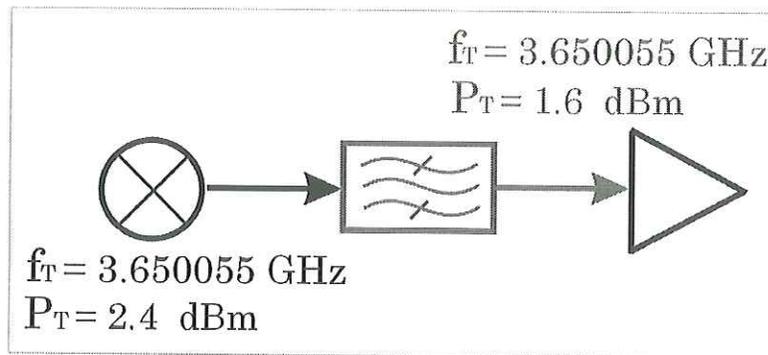


Figura 43 Parámetros de entrada y salida del filtro pasabanda en la etapa del transmisor del sistema de radar.

-*Filtros de elementos concentrados*: Estos están hechos principalmente por elementos concentrados y tienen un alcance en frecuencia en general hasta los 500 MHz.

-*Filtros de cavidad*: En este tipo de filtros la señal se hace pasar por una cavidad, frecuentemente metálica, donde dependiendo de las dimensiones físicas de esta cavidad, existe un cierto valor de frecuencia donde esta entra en resonancia y se logra un filtrado; el rango de estos filtros es muy amplio desde los 500 MHz hasta más de 200 GHz.

-*Filtros de resonador dieléctrico*: Se hace pasar la señal por un dieléctrico entre dos conductores metálicos, este está calculado para que resuene a una cierta frecuencia, se crea un efecto similar al de los filtros de cavidad con lo cual se puede lograr un fenómeno de filtrado, en este tipo de filtros se tienen frecuencias de hasta 30 GHz.

-*Filtros de microcinta y guía de onda*: Estos están formados por elementos distribuidos, los cuales son segmentos de microcinta o guía de onda, estos están calculados para actuar ya sea como capacitores o inductancias y mediante arreglos convencionales lograr etapas de filtrado.

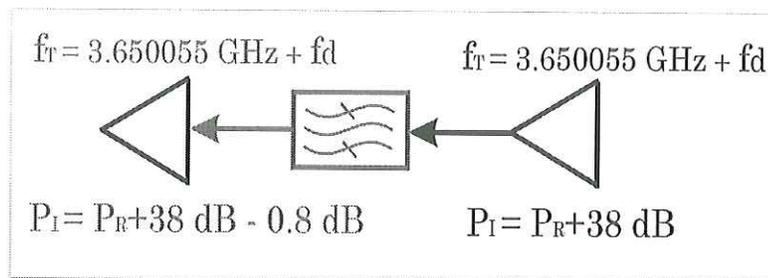


Figura 44 En esta se muestran los parámetros de entrada y salida para el filtro de alta frecuencia en la etapa de recepción del sistema de radar.

-*Filtros Interdigitados*: Formados a partir de líneas paralelas de microcinta en las cuales dependiendo de sus características físicas y las distancias entre ellas se puede modificar el efecto inducción electromagnética que existe y se logra un efecto de filtrado.

Todos los filtros anteriores pueden tener configuraciones, pasa bajas, pasa altas, pasa banda o en rechazo de banda.

Las características más importantes que se deben de tener en consideración para la utilización y elección de un filtro son las siguientes:

-*Pérdidas por inserción*: Este es el valor de las pérdidas que tendrá la potencia de la señal al pasar por el filtro, comúnmente oscilan alrededor de 0.5 dB.

-*Ancho de Banda*: Es el rango de frecuencia en el que el filtro tendrá efecto, dependiendo de su uso y tipo.

-*Frecuencia de corte o porcentaje de ancho de banda*: Este es un valor en el cual se especifica un cierto ancho de banda antes de que la potencia de la señal decaiga o se incremente 3 dB. Puede darse como un valor en frecuencia o un porcentaje de la frecuencia central a la cual trabaja el filtro.

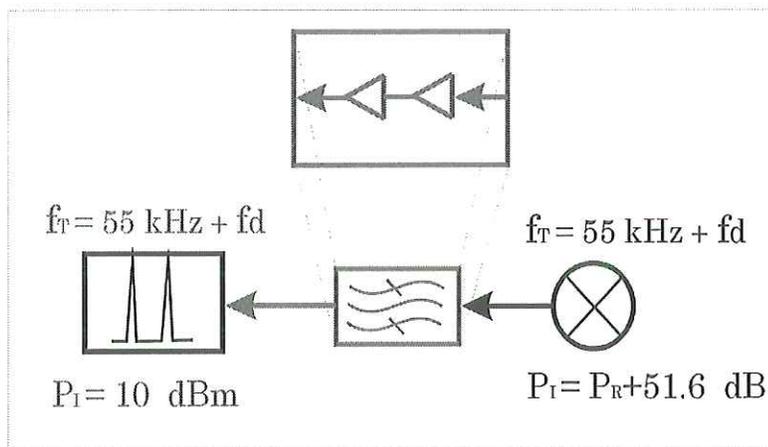


Figura 45 Entrada y salida, para el filtro de baja frecuencia en la etapa de recepción del sistema de radar.

-*Impedancias de entrada y salida:* Este el valor de la impedancia que se "vera" a la entrada y a la salida del filtro, esta siempre debe tener el mismo valor que los componentes conectados a la entrada y salida del filtro, para evitar perdidas por desacoplamiento de la señal; este usualmente es de 50 Ohms.

-*Perdidas por regreso o VSWR (Voltage to Standing Wave Ratio):* Son las perdidas debidas a la reflexión que sufre la señal electromagnética al ser procesada en el filtro o en otras palabras la impedancia intrínseca del sistema.

-*Atenuación en la banda de rechazo:* Es la atenuación en potencia que tendrá la señal por debajo de los 0 dB en la banda de frecuencias para las que el filtro esta diseñado a rechazar.

-*Manejo de potencia:* Son los niveles máximos y en algunos casos mínimos para que el filtro funcione correctamente.

Condiciones ambientales: Son las condiciones en las cuales el filtro puede operar, como son rangos de temperatura mínimos y máximos que soporta o la humedad.

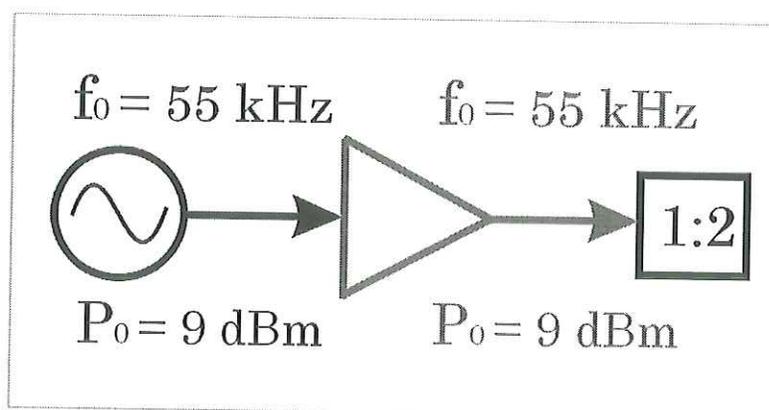


Figura 46 Parámetros de entrada y salida del amplificador de baja frecuencia.

Filtros de alta frecuencia

Los filtros aunque no se consideran esenciales dado el tipo de mezcladores y receptores que se utilizaran, su implementación daría una mejor respuesta en el sistema. Igualmente se hizo un análisis teórico de los filtros y sus características tanto físicas como de diseño. En el sistema los filtros más importantes serían dos de alta frecuencia. En el análisis de mercado se estudiaron los productos de más de diez compañías de dispositivos, este análisis arrojó un filtro que fabrica la empresa LARK ENGINEERING modelo 283650-300-3AA, siendo este un pasabanda interdigitado, con un rango de operación de 2 a 9 GHz, el cual es sintonizado desde fábrica a la frecuencia deseada, logrando un ancho de banda a 3dB del 4% de la frecuencia central. Sus parámetros se pueden considerar muy buenos y su precio moderado. En la figura 43 se observan los parámetros de entrada y salida del filtro, por un lado se tiene una entrada proveniente del "Up-Converter", a la salida la señal es dirigida al amplificador de potencia, este filtro solo dejara pasar a la salida la frecuencia de 3.65 GHz con un ancho de banda a 3

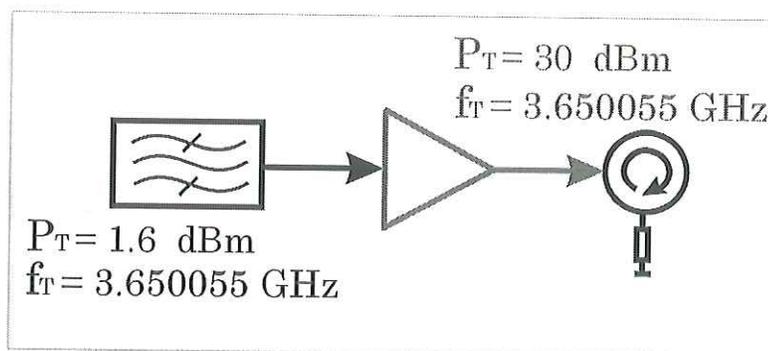


Figura 47 Nivel de potencia a la salida y frecuencia del amplificador de alta frecuencia en la etapa del transmisor para el sistema de radar.

dB de atenuación de 146 MHz, lo cual equivale al 4% de la frecuencia central. Además se tienen unas pérdidas por conversión de 0.8 dB, lo cual nos da una salida de 1.6 dBm.

Ahora en la figura 44 se muestran los parámetros de entrada y salida para el filtro de alta frecuencia en la parte del receptor, este tiene exactamente las mismas características que el usado en la etapa transmisora, este filtro tiene gran importancia, ya que es el que va a discriminar, todas las señales parásitas amplificadas junto con nuestra señal de interés.

Filtro de baja frecuencia

Este filtro figura 45 es un pasabanda, puede ser opcional por lo que no se hizo un análisis exhaustivo, por un lado maneja muy baja frecuencia, aproximadamente 55 kHz, y no se requiere gran calidad de filtrado, debido a las excelentes características del mezclador que lo antecede. Este filtro está formado por dos amplificadores operacionales OP-10, estos son amplificadores de alta precisión y bajo costo, distribuidos por la empresa Radio Shack en EU. El primer amplificador se usa en una configuración de filtrado, mientras que el otro regula la potencia de salida; esta dependerá del circuito

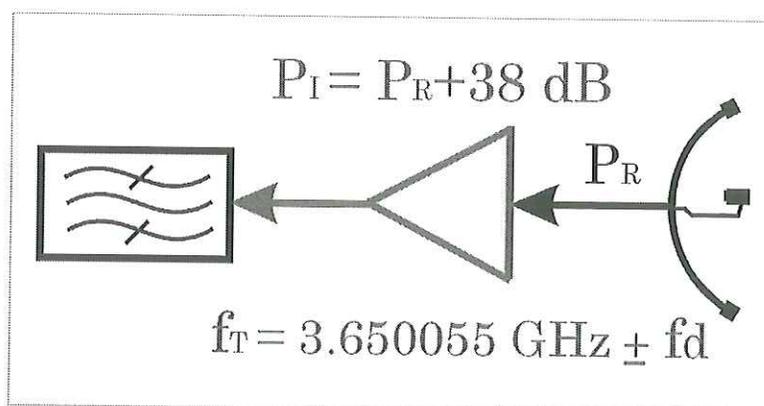


Figura 48 Niveles del amplificador de bajo ruido a la entrada del sistema de recepción del sistema de radar.

impreso que se realice y las pérdidas no contempladas que puedan surgir. Estas pérdidas no pueden ser cuantificadas ya que esto implicaría la construcción física del radar y dado que esta fuera de los objetivos de este trabajo solo se contempla, para su utilización. Únicamente se debe de tener en cuenta no sobrepase una potencia de salida de 10 dBm ya que podría causar un daño en los circuitos integrados que se contemplan en la sección del procesamiento de la señal.

IV.5.4 Amplificadores

Para la correcta elección de un amplificador se deben de tomar en cuenta las siguientes características:

-*Frecuencia de operación*: Referente al ancho de banda en el cual el amplificador esta garantizado para trabajar y obtener la respuesta dada por el fabricante.

-*Ganancia en potencia*: Es el parámetro referente a la ganancia que se tiene en el amplificador.

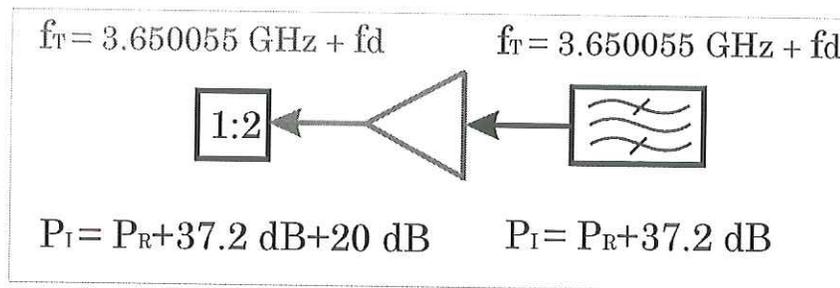


Figura 49 Parámetros del amplificador intermedio de baja potencia, en la etapa de recepción del sistema de radar.

-*Linealidad en ganancia:* A lo largo que un cierto rango dinámico, que tanto se conserva la linealidad en la ganancia de salida.

-*Potencia de salida:* La potencia máxima que se puede manejar a la salida del amplificador.

-*Potencia de saturación:* Es la potencia máxima que puede amplificar el dispositivo sin sufrir una distorsión en la señal de salida.

-*Potencia de entrada máxima:* La máxima potencia que puede soportar el amplificador sin sufrir un daño físico.

-*Eficiencia:* La eficiencia que se tiene en la relación de potencia suministrada de DC, contra la potencia entregada en RF.

-*Perdidas por regreso o VSWR :* Perdidas debidas a la reflexión por el desacoplamiento en los puertos de entrada y salida del amplificador.

-*Consumo de potencia:* La cantidad de potencia que consume el amplificador cuando se esta utilizando a su nivel más alto de amplificación lineal.

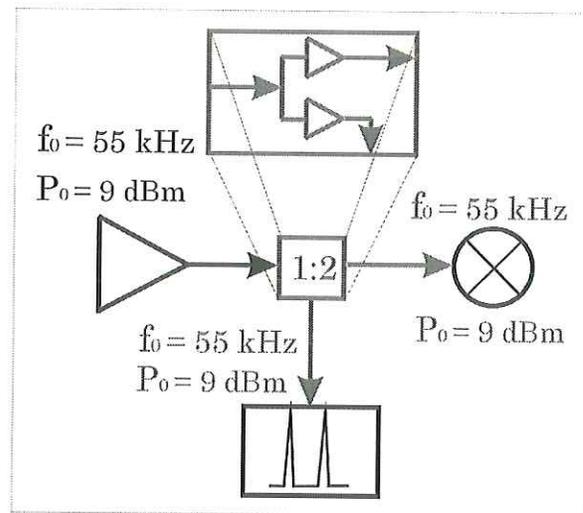


Figura 50 Configuración y parámetros de entrada y salida del divisor de potencia para la señal de baja frecuencia.

-*Factor de ruido:* Es la potencia del ruido a la salida del amplificador real en relación con la salida de una señal en un amplificador ideal, en la cuál se puede decir que no existe una señal de ruido añadida, todo esto a una temperatura fija.

Amplificador de baja frecuencia.

Este amplificador esta localizado a la salida del circuito integrado figura 46, que tiene la función de oscilador para la señal de baja frecuencia, sirve para amplificar el nivel de potencia que tiene el oscilador de baja frecuencia, ya que de aplicarle una carga podría dañarse, ya que no esta diseñado para soportar ningún tipo de carga. Es indispensable la utilización de un amplificador, dado que este amplificador es de baja frecuencia y no se requiere manejo de potencia, se opto por la utilización de un amplificador operacional OP-10, descrito con anterioridad. Con una sencilla configuración se puede variar la ganancia sin dificultad, en el caso de este diseño, únicamente se utiliza

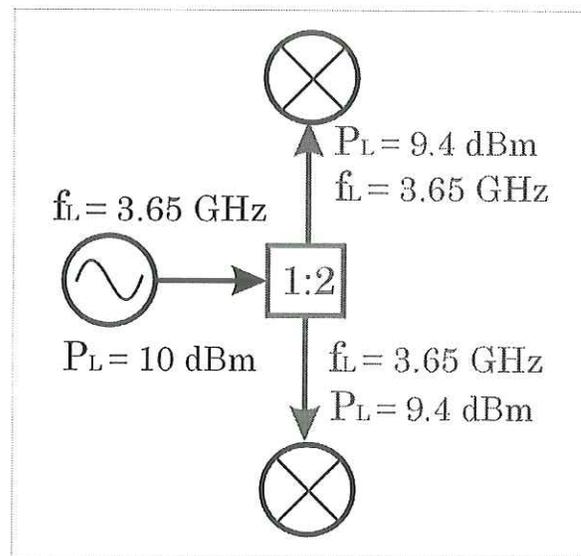


Figura 51 Parámetros de entrada y salida para el divisor de potencia conectado al oscilador de alta frecuencia.

como un seguidor, ya que el nivel de voltaje que sale del oscilador es alto, y el amplificador únicamente entrega la potencia requerida por el sistema en la etapa siguiente del divisor de potencia.

Amplificador de potencia

Para la etapa del transmisor se utilizaron dos amplificadores, uno de baja frecuencia que vimos anteriormente y otro de alta frecuencia figura 47 que suministrará la potencia necesaria para transmitir la señal a través de la antena en su viaje de ida y vuelta hasta el blanco. Este amplificador es vital para el funcionamiento del radar, ya que de él dependerá, la ganancia de salida y por lo tanto la distancia máxima al blanco así como el nivel de potencia recibida por el radar. Idealmente se utilizaría un amplificador de alta potencia arriba de 40 dBm, pero esto significa un considerable aumento en el costo del amplificador y los dispositivos subsecuentes. Después de un estudio sim-

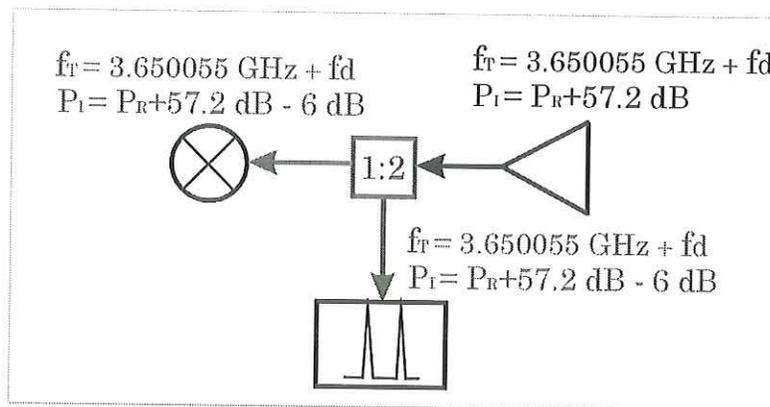


Figura 52 Configuración y parámetros del divisor de potencia utilizado en la etapa de recepción del sistema de radar.

ilar a los anteriores se eligió un amplificador MINI-CIRCUITS modelo ZVE-8G, este tiene un ancho de banda garantizado por el fabricante de 2 GHz a 8 GHz, lo cual nos da un margen para utilizar en un futuro este mismo amplificador con una mayor frecuencia a la utilizada en este diseño, maneja una ganancia de 30 dB y una potencia de salida garantizada de 30 dBm esto es 1 W de potencia, la señal proveniente del filtro con poco más de 1 dBm de potencia puede ser amplificada sin problemas casi 30 dB.

Amplificador de bajo ruido

Del amplificador de bajo ruido, dependerá la capacidad del radar de detectar niveles de potencia de la señal recibida figura 48. Dado el bajo nivel de potencia de la señal recibida, es esencial que este amplificador introduzca la menor cantidad de ruido posible, la ganancia pasa a segundo termino ya que para eso se utilizan amplificadores subsecuentes que amplifiquen la señal a un nivel de potencia mayor. El dispositivo que se eligió para este diseño, es de la marca MICROWAVE DB, modelo C020040D-4B1,

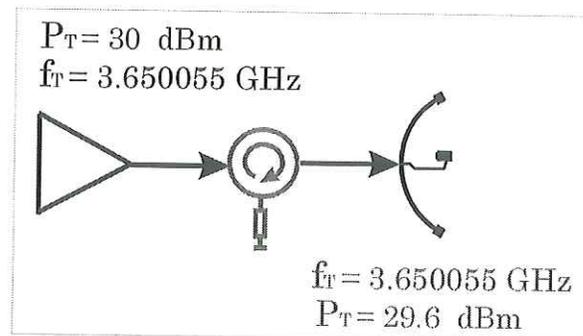


Figura 53 Niveles de entrada y salida, del circulator utilizado en la etapa del transmisor del sistema de radar.

este amplificador diseñado para aplicaciones en telecomunicaciones , tiene una ganancia excepcional de 38 dB y con un factor de ruido muy bajo 1.7 dB.

Amplificador de baja potencia

Dado que el amplificador de bajo ruido solo eleva la señal con un nivel suficiente para ser procesada más adelante por un dispositivo como es el filtro, el nivel que tiene la señal es tan bajo que se perdería si no se amplifica, debido a esto se utilizó un amplificador de baja potencia que lograra aumentar considerablemente la ganancia y minimizar las perdidas que se tienen más adelante en los dispositivos. El amplificador elegido es un MINI-CIRCUITS modelo ZRON-8G, con un ancho de banda de 2 GHz a 8 GHz, lo cual nos otorga lo beneficios antes mencionados. Además tiene una ganancia de 20 dB y un manejo de potencia considerable para un amplificador de esta clase de 20 dBm. En la figura 49 se observan los niveles potencia de entrada y salida para el amplificador, estos en función del nivel de potencia recibido por el radar.

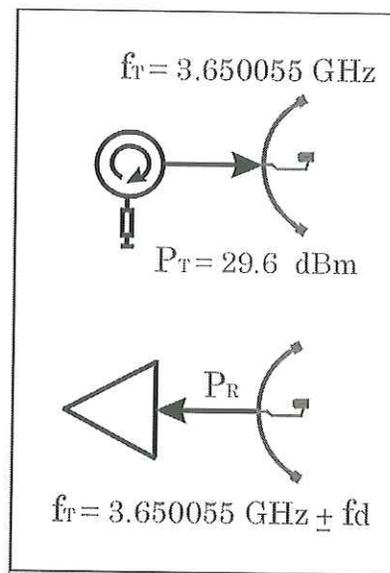


Figura 54 Parámetros de transmisión y recepción para el par de antenas utilizadas en el sistema de radar.

IV.5.5 *Divisor de potencia*

En el diseño de este sistema se utilizan tres divisores de potencia, los cuales tienen la función de dividir una señal entrante en dos con las mismas características en cuanto a modulación y frecuencia. Sin embargo, la potencia se ve disminuida a menos de la mitad, debido a que es dividida entre cada una de las salidas del dispositivo, además de las pérdidas internas que presente el divisor. A lo largo del diseño de este sistema se requiere utilizar la misma señal en dos diferentes dispositivos y además utilizando el mayor nivel de potencia posible en ambos, lo que impediría utilizar en este caso, un acoplador direccional el cual nos daría una atenuación de aproximadamente 10 dB en una de las salidas. Las características que se deben de considerar en la elección de el divisor de potencia son las siguientes:

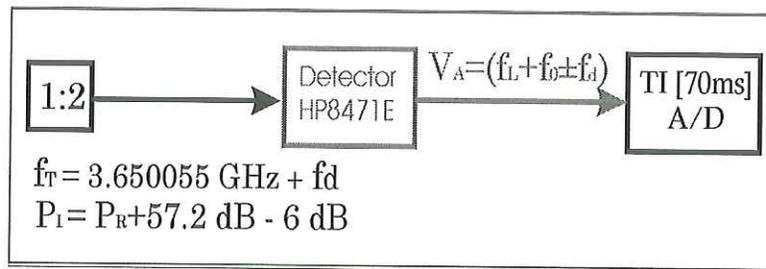


Figura 55 Diagrama de los parámetros de entrada y salida para el detector en la etapa del procesamiento de la señal.

-*Frecuencia de operación*: Referente al ancho de banda en el cual el divisor de potencia esta garantizado para trabajar y obtener la respuesta dada por el fabricante.

-*Aislamiento*: Nos da el aislamiento en dB que existe entre los diferentes puertos de entrada y salida que tiene el divisor de potencia.

-*Diferencia de fase*: Es la diferencia en fase que tendrán las señales de salida con respecto a la señal de entrada.

-*Pérdidas por inserción*: Este es el valor de las pérdidas que tendrá la potencia de la señal al pasar por el divisor, comúnmente oscilan alrededor de 0.5 dB.

-*Pérdidas por regreso o VSWR* : Pérdidas debidas a la reflexión por el desacoplamiento en los puertos de entrada y salida del amplificador.

-*Potencia de entrada máxima*: La máxima potencia que puede soportar el divisor sin sufrir un daño físico.

Divisor de potencia en baja frecuencia

En el primer divisor de potencia utilizado, no se utilizó un dispositivo clásico de microondas, con las características antes mencionadas, ya que la frecuencia que maneja es muy baja de tan solo 55 KHz, por lo que fue más conveniente utilizar una configu-

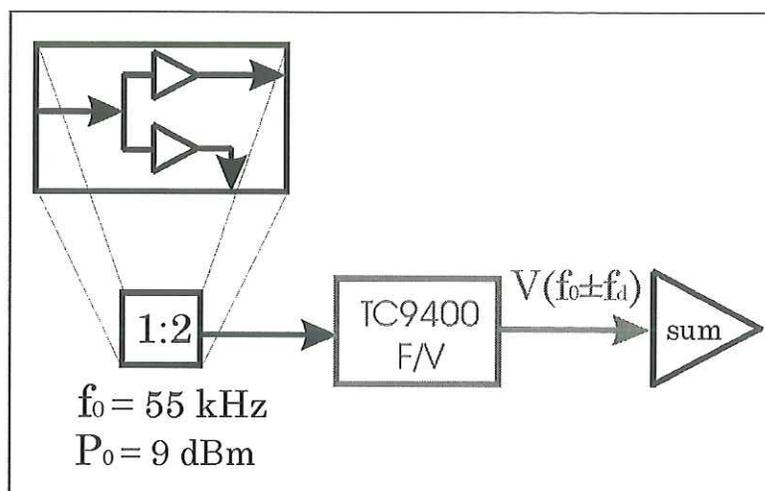


Figura 56 Parámetros del demodulador utilizado para la señal proveniente del oscilador de baja frecuencia.

ración de dos amplificadores operacionales como divisores de potencia figura 50. Esto porque resulta mucho más fácil su implementación a la salida del oscilador de baja frecuencia, económico y con la gran ventaja de poder manejar el nivel de potencia que se requiera a la salida. La división se hace dividiendo la señal de salida proveniente del oscilador de baja frecuencia hacia dos amplificadores operacionales, dado que estos tienen una muy alta impedancia de entrada, no se tendrá una carga en el dispositivo anterior, y con la configuración adecuada de amplificación se maneja la potencia deseada a la salida, con las mismas características de la entrada, sin sufrir pérdida alguna al recibir la carga que tendrá al conectarse con el dispositivo siguiente. Los amplificadores que se utilizaron son OP-10, que como se dijo anteriormente son amplificadores de precisión y excelentes características en cuanto a distorsión y amplificación.

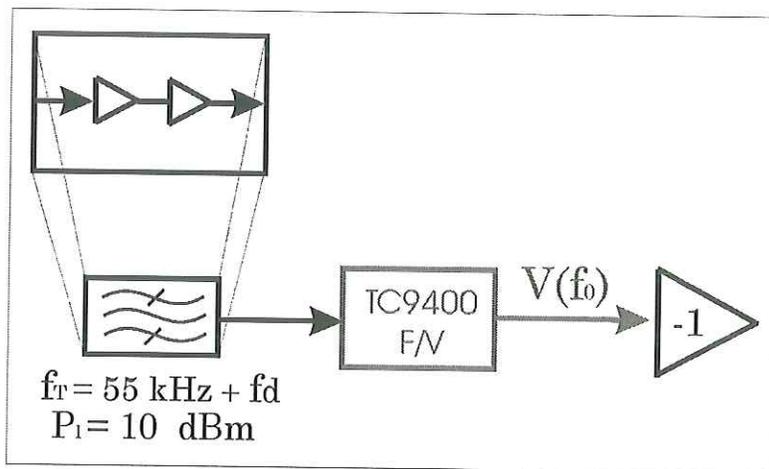


Figura 57 Parámetros del demodulador utilizado para la señal proveniente del receptor.

Divisor de potencia en alta frecuencia para el transmisor.

Los dos siguientes divisores de potencia cuentan con las mismas características, el primero es utilizado a la salida del oscilador de alta frecuencia y cumple con la función de dividir la señal proveniente del oscilador de alta frecuencia en dos como se ve en la figura 51. para poder utilizar exactamente la misma señal, tanto en frecuencia como en fase, en los dos mezcladores utilizados en el radar.

El segundo divisor de potencia se utiliza en la etapa de recepción este divide la señal de entrada reflejada por la superficie del mar, filtrada y amplificada previamente en dos partes con exactamente las mismas características, figura 52, las cuales serán utilizadas para fines diferentes en la etapa de procesamiento de la señal. Los divisores de potencia que se utilizaron son de la marca MINI-CIRCUITS modelo ZFSC-2-10G, este es un dispositivo que tiene unas pérdidas por inserción, considerables de 6 dB, pero dentro de los parámetros normales para un divisor de esta clase.

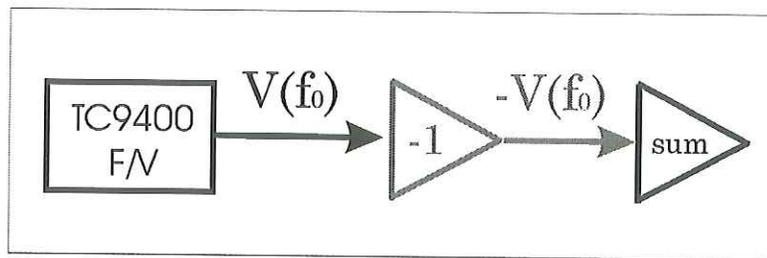


Figura 58 Diagrama a bloques y parámetros de entrada y salida del dispositivo inversor.

IV.5.6 *Circulador*

El circulador de microondas que se utilizó en el sistema de radar figura 53, tiene la finalidad, de aislar al amplificador de potencia de señales que pudieran entrar por la antena de transmisión e interferir en la señal de salida. Este dispositivo tiene la característica de permitir únicamente el paso de una señal en una sola dirección y atenuando cualquier señal que circule en la dirección opuesta, tiene un aislamiento entre los puertos de aproximadamente 20 dB para la mayoría de los circuladores comerciales. En este diseño se utilizó un circulador marca DITOM, modelo D3C2040, este dispositivo tiene buenas características, bajas pérdidas por inserción de 0.5 dB un aislamiento de 20 dB y puede soportar potencias de entrada de 40 dBm, lo cual le da un rango de seguridad muy amplio.

IV.5.7 *Antenas y polarotor*

En el sistema de radar propuesto se utilizaron dos antenas, esto como se dijo anteriormente, para reducir la complejidad en el diseño y sobre todo los costos, ya que el utilizar una sola antena, hubiera implicado lograr un aislamiento muy grande entre el módulo transmisor y el receptor o conseguir un sistema de conmutación entre el recep-

tor y transmisor, lo cual hubiera hecho que el radar no se comportara como un radar de onda continua "puro", afectando esto el procesamiento futuro de la señal, pero con la utilización de dos antenas, estos problemas se eliminan o por lo menos en el caso del aislamiento se reducen mucho. Las antenas propuestas figura 54, son dos parábolas, de 2.5 metros de diámetro, con el foco en el centro, se utilizaron estas antenas, ya que es una medida comercial, económica y muy manejable, en un futuro se podría ampliar el diámetro de la antena, pero eso dependerá de factores externos y las necesidades, ya que una parábola más grande implica otros factores como el costo, una mayor resistencia al aire, lo que provoca una mejor calidad en el material de la antena y una estructura mucho más firme para anclar la antena. Las características de diseño y respuesta de una parábola se vieron anteriormente y la respuesta esperada utilizando estas antenas se vera más adelante.

El Polarotor parte del sistema de la antenas de transmisión y recepción, este dará al sistema la posibilidad de cambiar la polaridad de la señal, a partir de un sistema automático, con esto el radar tendrá la posibilidad de estudiar los distintos efectos de la polaridad en la señal transmitida y recibida desde la superficie del mar. El polarotor que se va a utilizar es el modelo "Chaparral IE" el cual tiene incorporado una transición de guía de onda a cable coaxial.

IV.5.8 Detectores

En la figura 55 se muestra el detector, este es parte del sistema de procesamiento de la señal, el cuál será utilizado para procesar la potencia de la señal recibida. Este dispositivo realiza una integral a lo largo de un cierto ancho de banda y lo convierte en

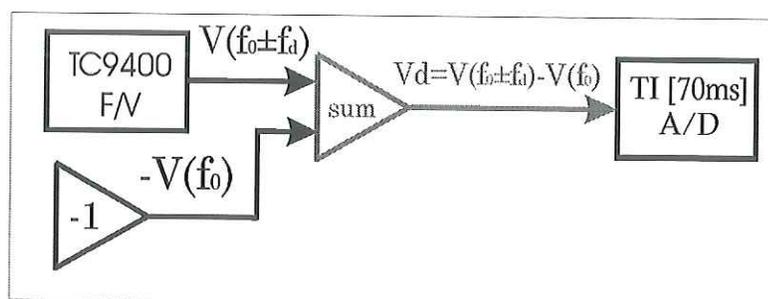


Figura 59 Diagrama a bloques y parámetros del dispositivo que realiza la diferencia de los voltajes de dos señales.

una diferencia de potencial, la cual puede ser procesada por un sistema de conversión analógico digital. Este dispositivo es el que le dará la posibilidad al radar de funcionar como un escaterómetro, independientemente del procesamiento Doppler del radar. El detector que se tiene previsto utilizar es un HP8771E, el cual puede trabajar hasta 12 GHz.

IV.5.9 Demodulador

El demodulador es un dispositivo el cual entrega una diferencia de potencial directamente proporcional a la frecuencia de la señal de entrada. Para el diseño de este módulo de procesamiento de la señal se eligió, un dispositivo semiconductor de precisión que trabaja en un rango de 0 a 100 kHz es ideal para manejar frecuencias como la Doppler que se espera obtener en el circuito que es debajo de 1 kHz, más menos 55 kHz del oscilador local. Este circuito integrado es el de la marca TELCOM modelo TC9400.

En la figura 56, podemos ver la configuración y sus parámetros a la entrada y a la salida, para el demodulador que procesa la señal proveniente del oscilador de baja

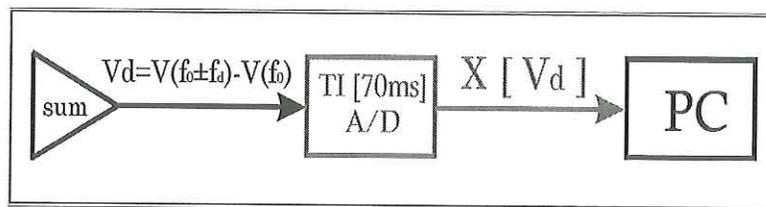


Figura 60 Parámetros de entrada y salida, en el convertidor analógico digital utilizado para procesar la señal del voltaje Doppler.

frecuencia. En este dispositivo entra una señal de 55 kHz y entrega una diferencia de potencial proporcional a dicha frecuencia.

En la figura 57, podemos observar el diagrama a bloques y los parámetros de entrada y salida del demodulador utilizado para procesar la señal proveniente del sistema receptor. Esta señal tendrá una frecuencia igual a la frecuencia del oscilador local de baja frecuencia de 55 kHz mas menos la frecuencia Doppler generada, el dispositivo entregará una diferencia de potencial equivalente a la frecuencia de dicha señal.

IV.5.10 *Inversor y sumador*

En el circuito del modulo de procesamiento de la señal se requirió el uso de una configuración que lograra por un lado invertir la polaridad de la diferencia de potencial proveniente de uno de los demoduladores y por otro, realizar la diferencia entre dos voltajes. En la figura 58 se observa el diagrama a bloques del dispositivo inversor, este dispositivo fue realizado a partir de un amplificador operacional de precisión marca Radio Shark modelo OP10.

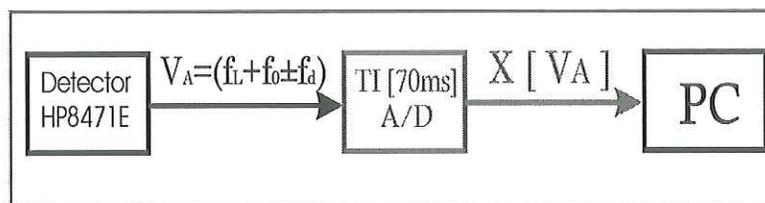


Figura 61 Parámetros de entrada y salida, en el convertidor analógico digital utilizado para procesar la señal del Detector.

En la figura 59 , se observa la configuración y los parámetros de entrada y salida, del dispositivo que realiza la diferencia de los voltajes, este al igual que el inversor, esta formado por un amplificador operacional de precisión OP10.

IV.5.11 *Convertidor analogico-digital*

El convertidor analogico digital, es un dispositivo el cual realiza un cierto muestreo sobre una señal analógica obteniendo una señal equivalente discreta en el tiempo, la cual puede ser procesada en valores binarios [Oppenheim *et al.*, 1994], para poder ser procesada digitalmente por una computadora.

En la figura 60 tenemos el diagrama a bloques y los parámetros de entrada y salida para el primer convertidor analogico digital utilizado en el sistema, por un lado entra el voltaje equivalente a la frecuencia Doppler obteniendo a la salida un valor binario equivalente a este voltaje. Se eligió para el diseño un dispositivo marca Texas Instruments, modelo TI70 , el cual realiza un muestreo cada 70 ms, este dispositivo entra al puerto paralelo de una computadora personal, y los valores de entrada son procesados por un programa adjunto al dispositivo, el cual entrega datos que pueden

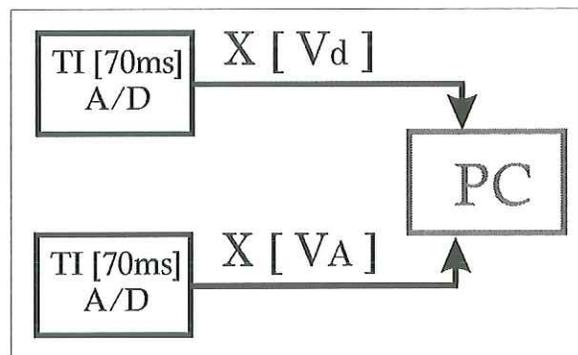


Figura 62 Diagrama a bloques de los parámetros de entrada para la computadora personal.

ser procesados en distintos programas como hojas de calculo o lenguajes tales como Matlab.

En la figura 61, observamos la configuración del segundo convertidor, este recolecta el valor del voltaje proporcional a la potencia de la señal recibida e igualmente lo convierte en valores binarios para ser procesado. Se utilizo el dispositivo modelo Texas Instruments modelo TI70, el cual tiene las características vistas anteriormente.

IV.5.12 *Computadora personal*

Por ultimo en la etapa de procesamiento de la señal, tenemos una computadora personal, esta debe cumplir únicamente con el requisito de contar con un procesador Pentium o compatible, ya que el programa adjunto al dispositivo convertidor analogico digital, requiere estas características para poder trabajar.

En la figura 62 se observa la configuración de las dos señales digitales provenientes de los convertidores, una vez que estas dos señales entran en la computadora y son

procesadas por el programa, los datos obtenidos pueden ser almacenados para un estudio posterior en la misma o bien en otra computadora.

IV.6 Calculo de la respuesta esperada.

Dado que el sistema a realizar tiene como uno de los principales propósitos precisamente el de estudiar la interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie del mar, no sería posible dar un cálculo específico de la respuesta que se tendrá, por lo menos en lo concerniente a la interacción directa de las ondas electromagnéticas y la superficie del mar.

Cuando hablamos de la respuesta esperada, solo podemos dar ciertos datos y relaciones útiles para el usuario en los que se contemplan los valores máximos y mínimos en la respuesta de los parámetros que se espera tendrá el radar a la salida y a la entrada como por ejemplo la frecuencia Doppler que se esperaría, basado en los datos de diseño.

El radar planeado en el diseño trabajará a una frecuencia de 3.65 GHz y se tiene contemplada una antena de 2.5 metros de diámetro con estos parámetros se puede dar un rango en el cuál se encontrara la frecuencia Doppler que obtendremos. En la figura 63 podemos ver la relación entre la frecuencia Doppler y la velocidad a nuestra frecuencia de trabajo. En esta se puede observar la máxima frecuencia Doppler que se obtendrá, relacionada con la velocidad de las olas en la superficie del mar. De esta manera, al estudiar la respuesta se puede saber que una velocidad mucho mayor, no estará relacionada tal vez con un movimiento en el mar sino con un objeto externo, que se encuentre cercano al haz de iluminación del radar.

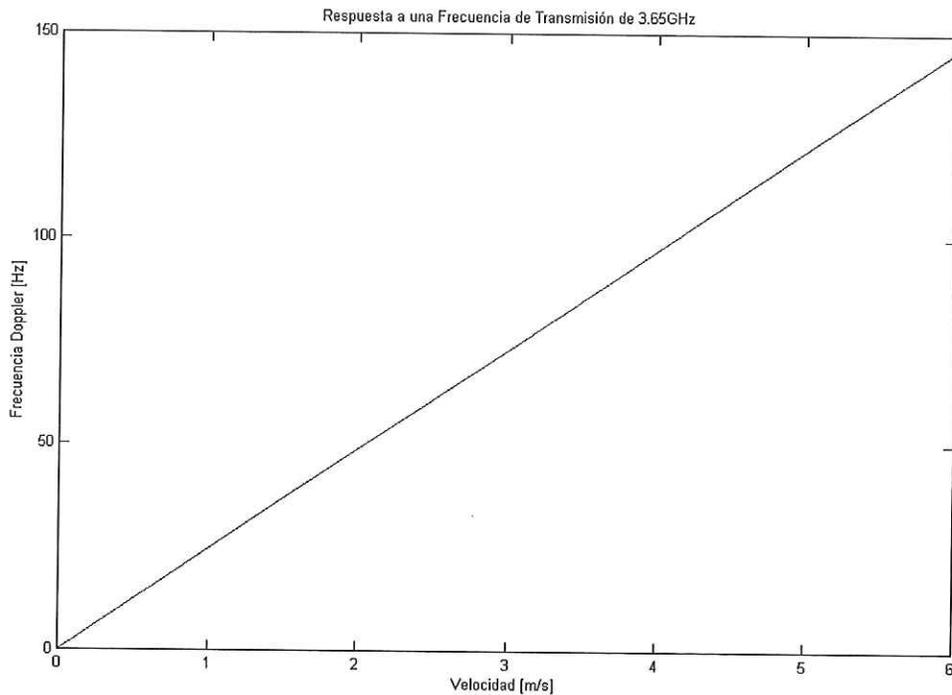


Figura 63 Relación entre la frecuencia Doppler y la velocidad del blanco si se tiene una frecuencia de transmisión de 3.65 GHz.

Otro parámetro muy importante que hay que tener en consideración para la respuesta es el área de iluminación que se tendrá. Esta estará relacionada directamente con la distancia y el ángulo que tenga la antena como es indicado en la figura 64.

En la anterior se observa cuál es la distancia a considerar, mediante un cálculo sencillo de trigonometría: $d = \frac{h}{\cos \theta}$. Calculando la distancia que tenemos hacia la superficie del mar podemos relacionar el área de iluminación del radar cuando trabajamos a la frecuencia de 3.65 GHz y tenemos una antena como la mencionada anteriormente de 2.5 metros de diámetro. En la figura 33, tenemos la relación entre la distancia al blanco y el área de iluminación.

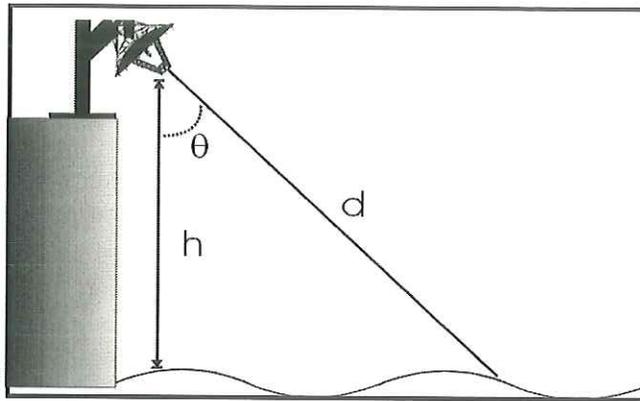


Figura 64 Referencia para calcular la distancia del punto donde se localizará el radar, hasta la superficie del mar.

Ahora debemos de considerar que el cálculo anterior es únicamente para calcular la distancia lineal del foco de la antena a la superficie del mar, pero esta distancia sólo será válida en un punto. Sin embargo, debido a que nuestro blanco es una superficie la cuál es mucho más grande que el área de iluminación del radar, se deben de tomar en consideración varios factores.

En la figura 36 se dio la relación del área de iluminación de la antena, pero para el caso de que el foco del radar tuviera un ángulo de incidencia de 0° con la superficie del mar. Esta área es la mínima que se puede obtener con los parámetros dados de distancia al blanco y frecuencia de transmisión.

En la realidad dado que el radar estará en una base sobre la superficie de la tierra, será imposible tener ángulos de incidencia de 0° , como se muestra en la figura 66.

El área de iluminación depende de tres parámetros la distancia o altura del radar, el ángulo de incidencia y los ángulos horizontal y vertical del patrón de radiación que

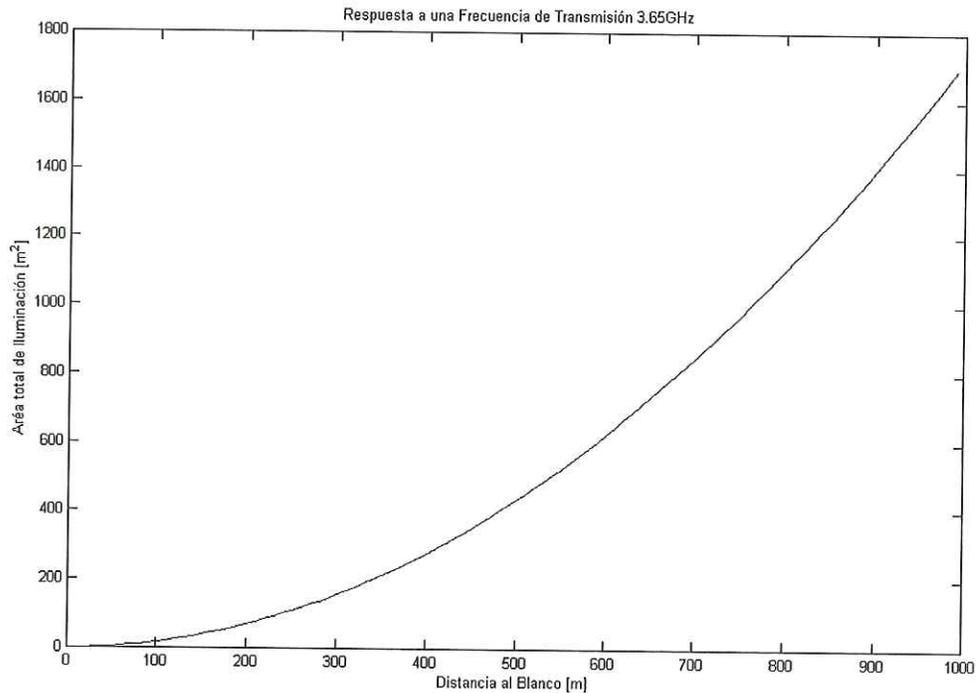


Figura 65 Relación del área de iluminación del radar en la superficie del mar, con la distancia a la cual se coloque el radar, para una frecuencia de transmisión de 3.65 GHz.

como se vio en las figuras 34 y 35 depende del diámetro de la antena y la frecuencia de transmisión.

En la vista desde arriba, se puede ver que el área iluminada por el radar que se forma es idealmente un óvalo pero dado que estamos usando solo dos ángulos en el plano vertical y horizontal podemos aproximarlos a un trapecio, el cuál tendrá una altura que dependerá directamente del ángulo vertical del patrón de radiación y dos lados que dependerán del ángulo horizontal, y estos dos parámetros están geoméricamente relacionados, tanto con la altura como con el ángulo de incidencia.

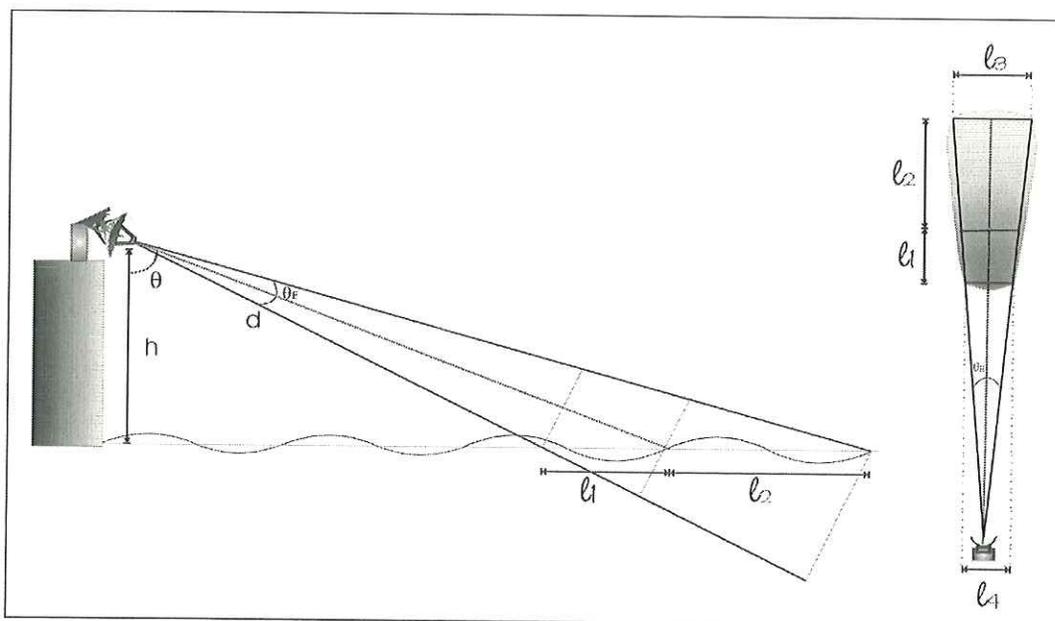


Figura 66 Relación geométrica y concentración de energía en el área iluminada por el radar, en relación con la distancia, el ángulo de incidencia y el ángulo vertical y el horizontal del patrón de radiación de la antena.

De esta manera para poder calcular esta área debemos de establecer una relación entre todos estos parámetros. En la figura 67 podemos ver la relación que tiene el área de iluminación del radar, con la distancia al blanco y el ángulo de incidencia que tiene el radar. Se debe de tomar a la distancia como espacio lineal entre el foco de la antena y la superficie del mar. Como se puede ver en esta gráfica, la distancia máxima que se tenía a mil metros de distancia en la gráfica de la figura 65, es la mínima a esa misma distancia, esto debido a la geometría de iluminación vista en la figura 66, observando que el incremento del área es muy grande, obteniendo en ángulos comunes de 45° casi el doble de área.

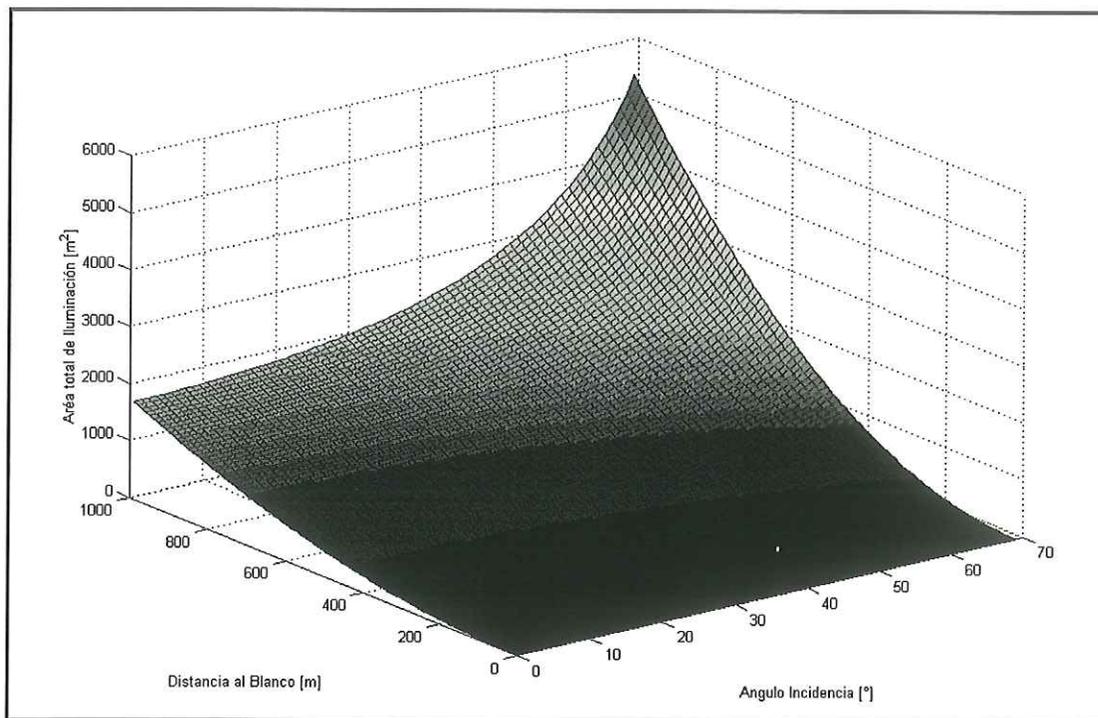


Figura 67 Relación entre la distancia lineal de la superficie del mar con el foco la antena, el ángulo de incidencia tomándolo en dirección contraria a las manecillas del reloj y el área de iluminación del radar.

Esto es importante para poder tener un control de que parte de la superficie del mar es la que se esta cubriendo, además de poder tener una relación de la densidad de potencia distribuida en el área.

A continuación, nos ocuparemos de otro parámetro fundamental a considerar, este es la densidad de potencia que obtendremos sobre el área iluminada por el radar, ya que de esto dependerá la respuesta que podamos obtener del mar.

Como se muestra en la figura 68, la densidad de potencia es sumamente grande para distancias cortas y ángulos de incidencia pequeños, lo que se traduce en un área pequeña, en la cuál tendremos mayor potencia distribuida por metro cuadrado, obte-

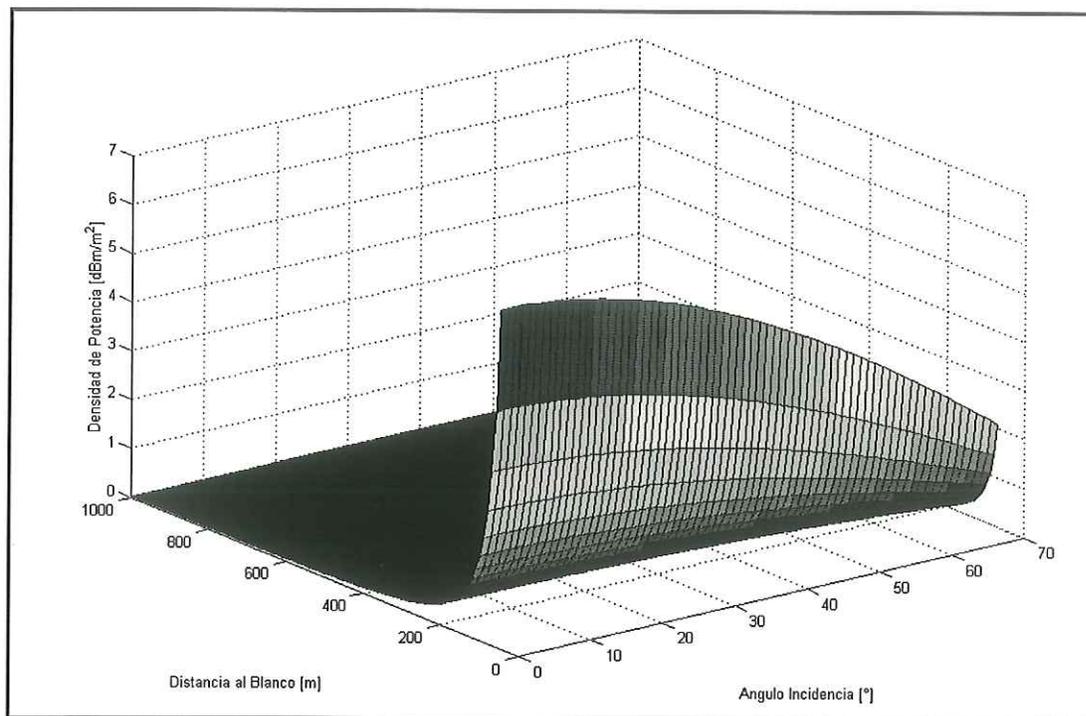


Figura 68 Relación de la densidad de potencia, con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 0 a 1000 metros.

niendo con esto una respuesta con mayor potencia en la dirección del radar desde la superficie del mar.

En la figura 69 observamos la misma relación que la gráfica anterior, pero con una resolución mayor, desde 200 hasta 1000 metros de distancia, para de esta manera observar con más detalle los niveles de potencia que se tiene. Encontrando a 200 metros de distancia una densidad de potencia de $3.35 \frac{dBm}{m^2}$, con ángulos de incidencia de 0° .

En la figura 70, observamos la máxima resolución para la misma relación de las gráficas anteriores, la cual va de un rango desde 500 metros de distancia hasta 1000 metros, y podemos observar que a una distancia de 500 metros tenemos una densidad

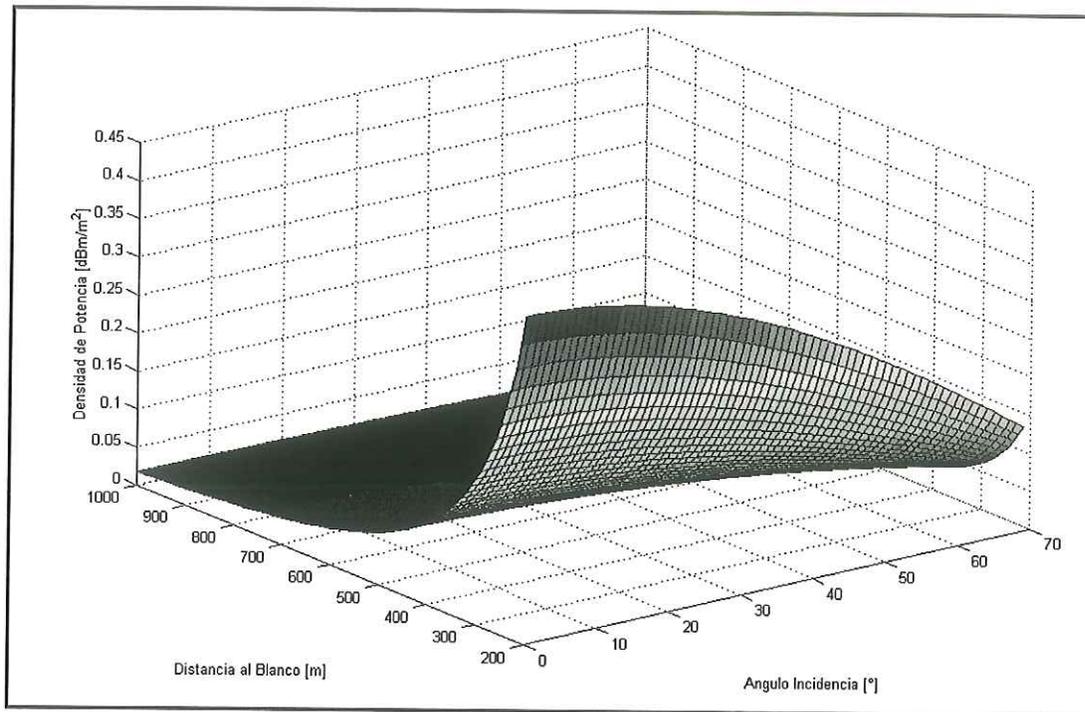


Figura 69 Relación de la densidad de potencia, con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 200 a 1000 metros.

de potencia de $0.05 \frac{dBm}{m^2}$, y ha 1000 metros de $0.008 \frac{dBm}{m^2}$. De esta manera podemos observar y tener una visión clara de en que medida afecta la distancia, manteniendo un ángulo fijo a la densidad de potencia que obtengamos, y esto es debido a que el área iluminada tiene un comportamiento exponencial directamente proporcional a la distancia a la cual coloquemos el radar.

En la figura 71, podemos observar los contornos de la densidad de potencia, donde podemos a partir de una cierta distancia fija, aumentar la densidad de potencia variando únicamente el ángulo de incidencia. Así en el caso de que al estar operando el radar, estemos obteniendo muy bajos niveles de potencia en la recepción, y la distancia sea una

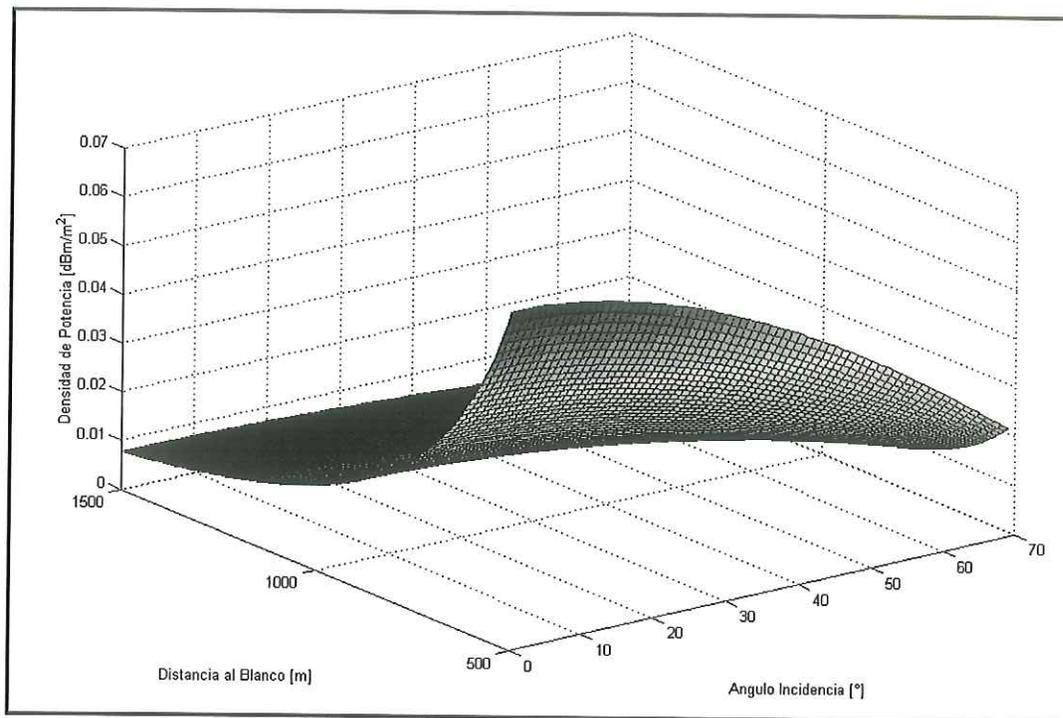


Figura 70 Relación de la densidad de potencia, con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 500 a 1000 metros.

prioridad, podemos variar el ángulo de incidencia de tal manera, que nuestra densidad de potencia aumente y por tanto nuestro nivel de señal recibida.

Otro factor que hay que tener en consideración, al tratar de calcular la densidad de potencia, son las pérdidas que tendrá la señal al viajar por la atmósfera terrestre. En la figura 72, se observa la gráfica que nos relaciona las pérdidas en dB por kilómetro contra la frecuencia de la señal que viaja [Barton *et al.*,1998] para dos casos el primero cuando existe "aire seco", esto es referente a un bajo nivel de humedad en la atmósfera y el segundo cuando existe "neblina", para una alto nivel de humedad en la atmósfera.

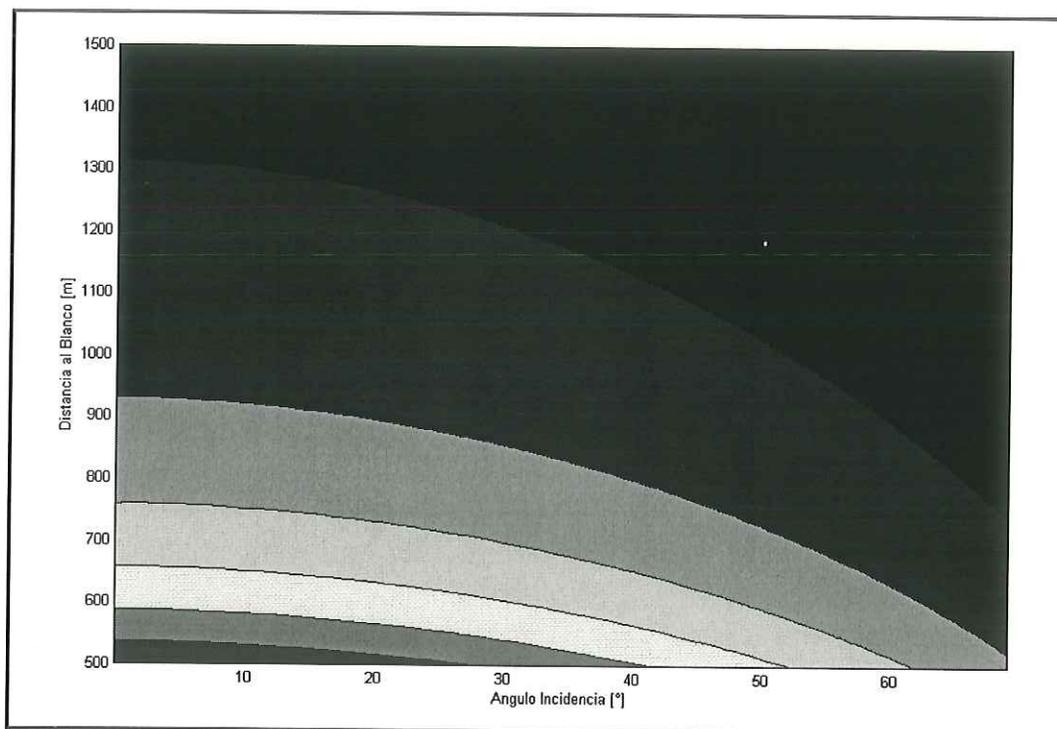


Figura 71 Contornos de la densidad de potencia en relación con el ángulo de incidencia y la distancia al blanco para el rango de 500 a 1000 metros.

También podemos ver las marcas expuestas en esta gráfica, las cuáles están calculadas para la frecuencia de transmisión del radar de 3.65 GHz, y encontramos que para un día despejado tendremos pérdidas de 0.017 dB/km, mientras que para un día nublado encontramos que las pérdidas son de 0.022 dB/km. En caso de ser un día lluvioso sin duda estas pérdidas aumentan, pero la relación de pérdidas será proporcional a la cantidad de precipitación existente en ese día.

Los cálculos anteriores nos ayudan a comprender la respuesta que tendrá el radar, cuando este interactuando con la superficie del mar. Desafortunadamente que tipo de respuesta pueda tener el mar y en que porcentaje de la potencia incidente será reflejada

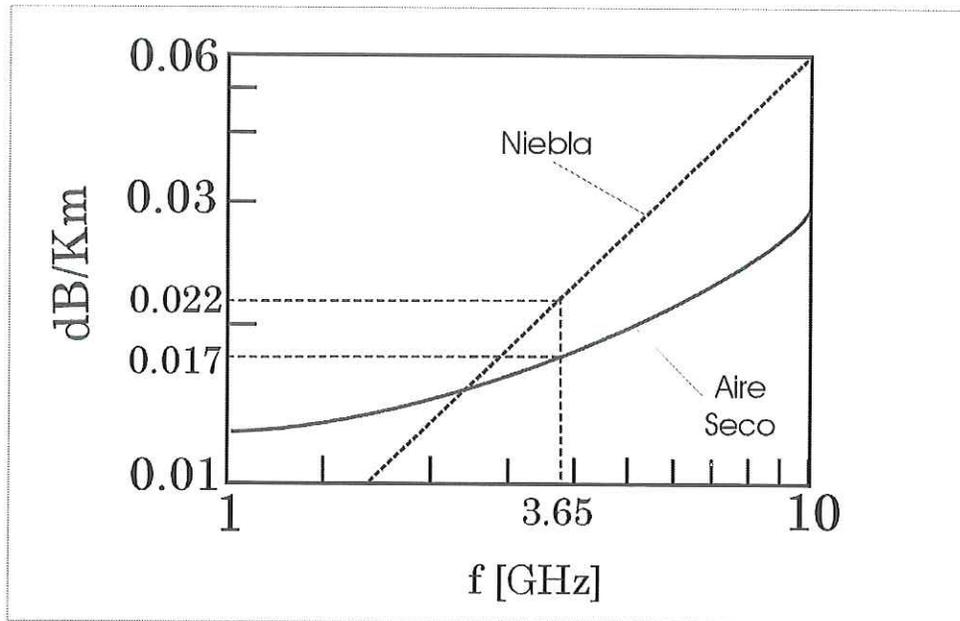


Figura 72 Relación de pérdidas en dB/km contra la frecuencia en GHz en la atmósfera terrestre al nivel del mar, de tiempo seco y con neblina. [Barton ,1998]

en la dirección del radar es prácticamente imposible de predecir, ya que esta respuesta es precisamente uno de los parámetros que se busca estudiar con el radar.

Sin embargo, como hemos visto a lo largo de este trabajo, lo que si podemos augurar es que esta respuesta estará directamente relacionada con la velocidad del viento y con el tamaño del oleaje y en el caso de que el estado del mar sea de completa calma, tendremos una reflexión especular, la cual reflejaría toda nuestra señal transmitida en una dirección distinta a la del radar, obteniendo en la fase de recepción un nivel de potencia nulo, sin embargo en un mar agitado por el efecto del viento por ejemplo, la reflexión difusa será muy grande, ya que se crearan una gran cantidad de frentes geométricos creando "paredes" que reflejaran una mayor cantidad de potencia hacia el radar.

Además de los parámetros involucrados que pueden ser "predecibles" en la respuesta del radar, existirán otros que dependerán del entorno en el cual se coloque el radar como pueden ser estructuras metálicas, rocas, acantilados o islas próximas que abarquen el área de cobertura del radar, o incluso un gran tráfico marítimo que este afectando la respuesta obtenida en el radar. Sin embargo, estos casos sólo pueden ser mencionados y su relevancia en las mediciones podrá ser cuantificada en la practica.

V Conclusiones

V.1 Aportaciones

Este diseño considera un sistema simple de un radar de onda continua con el cual se puede obtener la frecuencia Doppler resultante de la interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie del mar. A la vez, se puede estudiar la potencia de las señales de microondas reflejadas por la superficie del mar. Este estudio, da una base para el desarrollo de radares Doppler para aplicaciones oceanográficas o similares, con tecnología de bajo costo. A su vez, se dió una referencia de los parámetros físicos más comunes que describen el funcionamiento y respuesta de un radar de estas características.

En lo que respecta al diseño del radar, se incursionó en el diseño de un radar realista y realizable, partiendo de la teoría básica de radares. Debido a que en general esta tecnología es aplicada a sistemas militares y aeroespaciales, la disponibilidad de diseños realizables es, en nuestra experiencia, prácticamente nula. Debido a esto, se decidió tener un diseño lo más simple y predecible posible, ya que no se tiene experiencia en esta materia.

Por otro lado se ideó un sistema para realizar el procesamiento de la señal que, igualmente, fuera lo menos complejo posible; esta fue una propuesta para analizar y obtener la frecuencia Doppler. Además, con el diseño propuesto es posible estudiar la

ganancia, siendo esta un parámetro poco estudiado y de gran interés cuando se estudia la interacción entre las ondas electromagnéticas y la superficie del mar.

Los cálculos realizados y los resultados obtenidos fueron enfocados a darle un gran grado de adaptabilidad al radar, queriendo decir con esto, que dado que el radar tiene como función precisamente la de estudiar la respuesta que pueda tenerse de la superficie del mar, solo se pueden dar variables en las cuales puede funcionar el radar, como la distancia a la cual se coloque, la frecuencia Doppler que puede obtenerse o el área que se espera cubra el radar sobre la superficie del mar. Esto hace posible que el usuario del sistema tenga una base de referencia para la utilización y en dado caso la modificación de los parámetros del mismo.

Un punto que llevo bastante tiempo y con el cual se da un diseño completo, fue la elección de los componentes que conforman el radar. Se realizó un estudio de los componentes a utilizar en el diseño para después, para después buscar la disponibilidad de estos en el mercado, y seleccionar los que se adaptarían mejor al diseño original.

V.2 Recomendaciones

El sistema diseñado en este trabajo, está sujeto a un gran número de posibles mejoras. Como se dijo anteriormente, es una base de inicio para el diseño de radares. El proyecto de diseño estuvo restringido por dos factores. Primero el económico, que definió la frecuencia más alta a utilizar. Un pequeño incremento en la frecuencia o la potencia de transmisión hace que el costo del radar crezca exponencialmente. Una recomendación para un diseño futuro sería el restringir en menor medida el costo del radar, para de

esta manera poder aumentar la frecuencia de operación. Esto daría como resultado una respuesta en frecuencia Doppler más alta y por consiguiente, más manejable en su procesamiento. También se tendrá un área de iluminación menor, que nos dará un mejor control de la zona de estudio, además de aumentar la potencia de transmisión, con la cual podríamos abarcar una mayor distancia y conseguir que el radar aumentara su sensibilidad. El segundo factor fue el de la disponibilidad de los componentes necesarios para la fabricación del radar. Este último factor es mucho menos controlable que el factor económico, debido a que está fuera de nuestras manos, por una parte ampliar la disponibilidad de componentes que produce un fabricante y por otra modificar las regulaciones comerciales y de exportación que los países fabricantes de dispositivos imponen a estos productos con el fin de evitar transferencias tecnológicas que estén fuera de su control. En este ámbito, una recomendación sería solicitar por parte de autoridades competentes, transferencias tecnológicas en esta rama con fines de investigación.

Otra propuesta, sería la de mejorar el sistema de baja frecuencia destinado al procesamiento de la señal. Esto se podría lograr, por una parte construyendo un demodulador que con un intervalo de frecuencias más flexible, de mayor precisión, e implementar un programa destinado al procesamiento de la señal recibida. Esto ayudaría al manejo de los datos que pudieran recibirse, ya que actualmente solo se tiene contemplado la acumulación de datos, pero estos deben ser procesados separadamente.

Dado que el proyecto está destinado a la construcción de un radar, realizable a corto plazo. Una ampliación del sistema de radar, primero debe ser analizada en cuanto a disponibilidad de componentes y análisis de costos.

LITERATURA CITADA

- Adamson T.A, 1992, "Electronic Communications", Delmar, E.U.
- Barton D.K. and Leonov S.A., 1998, "Radar Technology Encyclopedia", Artech House, USA.
- Connan G., Griffiths H. and Garello R., 1999, "Millometre Wave Measurements From Laboratory Surface Waves". IGARSS'99 Proceedings, Germany.
- Espedal H.A., Johannessen M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D.R. and Knulst C., 1998, "COASTWATCH'95 : ERS, SAR detection of natural fil on the ocean surface " , J. Geophys. Vol 103, No C11, Octubre 1998, pp. 24969-2498
- Ewell G.W., 1981, "Radar Transmitters", McGraw Hill, E.U.
- Feindt F., Wismann V., Alpers W. and Keller W.C., 1986, " Airbone measurements of ocean radar cross section al 5.3 Ghz as a function of wind speed ", Radio Science, Vol. 21 No. 5 Septiembre 1986, pp. 845-856.
- Garcia A., 1992, "Calculo de Antenas", Alfaomega, México.
- Hibbeler R.C., 1994, "Mecánica para Ingenieros Dinámica", CECSA, México.
- Karode S.L. and Fusco V.F., 1998, "Feedfoward Embedding Circulator Enhancement in Transmit/Recibe Amplications", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 8 No. 1.
- Keller W.C., 1990, "Cross sections and modulation Transfer functions at L an Ku bands, measured during the tower ocean wave and radar dependence experiment", J. Geophys. Vol 95, No C9, septiembre 1990, pp. 16277-16289.
- Komen G.J., 2000, "Forecasting wind-driven ocean waves", Satellite Oceanography, CICESE, México.
- Koryu I.T., 1970, "Analysis of Target-Speed Determination with Doppler Radar", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol IM-19, No. 2.
- Lapatine S., 1994, " Electrónica en Sistemas de Comunicación", LIMUSA , México.
- Levanon N., 1998, "Radar Principles", Wiley , E.U..

- Longuet-Higgins M.S., 1987, "The propagation of short surface waves on longer gravity waves" , J. Fluid Mech vol. 177 pp. 293-306, Gran Bretaña.
- McGregor J.A., Poulter E.M. and Smith M.J., 1998, " S band Doppler radar measurements of bathymetry wave energy fluxes, and dissipation across an offshore bar " , J. Geophys. Vol 103, No C9, Agosto 1998, pp. 18779-18789.
- McGregor J.A., Poulter E.M. and Smith M.J., 1994, "Switching system for single antenna operation of an S-band FMCW radar" ,IEE Proc.-Radar,Sonar Navig., Vol 141, No.4, Agosto 1994, pp 241-248.
- Moore R.K. and Fung A.K., 1979, "Radar Determination of Winds at Sea" ,Proceedings of the IEEE, Vol 67, No. 11, Noviembre 1979, pp 1504-1520.
- Oppenheim A.V., 1994, "Señales y Sistemas", Prentice Hall, Mexico.
- Plant W.J. and Keller W.C., 1990, " Evidence of Bragg Scattering in Microwave Doppler Spectra os Sea Return" , j. Geophys. Vol 95, No C9, Septiembre 1990, p.p. 16,299-16,310.
- Poulter E.M., Smith M.J. and McGregor J.A., 1994, "Microwave backscatter from the sea surface: Bragg scattering by short gravity waves " , J. Geophys, Vol. 99 No C4, Abril 1994, pp. 7929-794
- Poulter E.M., Smith M.J. and McGregor J.A., 1990, " Microwave Radar Measurements of Ocean Wave Propagation" , J. Geophys. , Vol. 17 No. 12 Noviembre 1990, pp. 2137-2140.
- Poulter E.M., Smith M.J. and McGregor J.A., 1995, "S-Band FMCW Radar Measurements of Ocean Surface Dynamics", J. Atmospheric and Ocean Technology, Vol. 12, Marzo 1995, pp. 1271-1286.
- Pozar D.M. 1990, "Microwave Engineering" , Addison-Wesley , E.U.
- Skolnik M.I., 1980, "Introduction to Radar Systems", McGraw Hill, E.U.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E. and Goldstein R.M., 2000, "Synthetic Aperture Radar Interferometry", Proceedings of the IEEE, Vol. 88 No.3, Marzo 2000, pp. 333-381.
- Valey V.F., 1987, "Modern Microwave Technology" , Prentice-Hall , E.U. 1987.

Anexo I. CIRCUITO DEL MODULO DE BAJA FRECUENCIA Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.

A continuación se dan los pasos y cálculos seguidos para los componentes utilizados en el diseño del modulo de baja frecuencia así como el de procesamiento de la señal.

Cálculos para los componentes del oscilador de baja frecuencia

De acuerdo a las especificaciones del fabricante del circuito integrado ICL8038, el cual tiene la función de ser el oscilador de baja frecuencia . podemos calcular la frecuencia de oscilación del circuito, esta sera igual a:

$$f = \frac{1}{\frac{R_A C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)}$$

Sin embargo para obtener un ciclo de trabajo del 50%, con lo cual obtendríamos una senoidal perfecta, y de acuerdo a los parámetros especificados por el fabricante, R_A debe de ser igual a R_B , por lo que:

$$R_A = R_B = R$$

$$f = \frac{0.33}{RC}$$

La frecuencia de operación del oscilador sera de alrededor de 50 KHz, de esta manera fijando un valor comercial para la resistencia de 400K, obtenemos la valor de la capacitancia:

$$C = \frac{0.33}{400,000 \cdot 50,000} = 16.5 \text{ pF}$$

Este valor no es un valor comercial común, el valor más cercano es 15 pF, con este valor podemos obtener la frecuencia que obtendremos del oscilador.

$$f = \frac{0.33}{15 \times 10^{-12} \cdot 400 \times 10^3} = 55,000 \text{ Hz}$$

Los valores restantes de los dispositivos, son de acuerdo a las hojas de especificaciones.

Cálculos para los amplificadores operacionales seguidores

Uno amplificador operacional seguidor, es un amplificador con ganancia unitaria, tiene la función en este caso, de evitar una caída en el voltaje de salida del oscilador, debido a la carga que se le presentara al ser conectado a dispositivos de baja impedancia.

El calculo básico para obtener una ganancia unitaria en el amplificador operacional de precisión OP10 es:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_0$$

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$V_1 = V_0$$

$$1 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

Podemos ver que la única manera de tener la ganancia unitaria seria el no utilizar las resistencias en el amplificador operacional.

Cálculo para el amplificador operacional inversor

Para invertir la polaridad de una señal, en este caso se utilizó un amplificador operacional con una configuración inversora, tenemos:

$$V_0 = -\frac{R_f}{R_1}V_1$$

De esta manera podemos seleccionar que $R_f = R_1$, para garantizar que la ganancia será lo más cercana a uno, seleccionando un resistor comercial y que maneje una cantidad razonable de corriente tomamos:

$$R_f = R_1 = 1K\Omega$$

Cálculo para el amplificador operacional sumador

Para realizar la diferencia de voltajes, se utiliza un amplificador operacional con una configuración de sumador:

$$V_0 = -\left(\frac{R_f}{R_{11}}V_{11} + \frac{R_f}{R_{12}}V_{12}\right)$$

Para tener un equilibrio entre ganancias y resistencias, igualmente se tomará $R_f = R_{11} = R_{12} = 1K\Omega$, con lo cual y sabiendo que V_{11} tiene un valor negativo:

$$V_0 = -(V_{12} - V_{11})$$

Respuesta general para el circuito

Antes, se debe mencionar que los componentes utilizados en los dos demoduladores TelCom TC9400, fueron dados por la hoja de especificaciones del fabricante para un óptimo resultado.

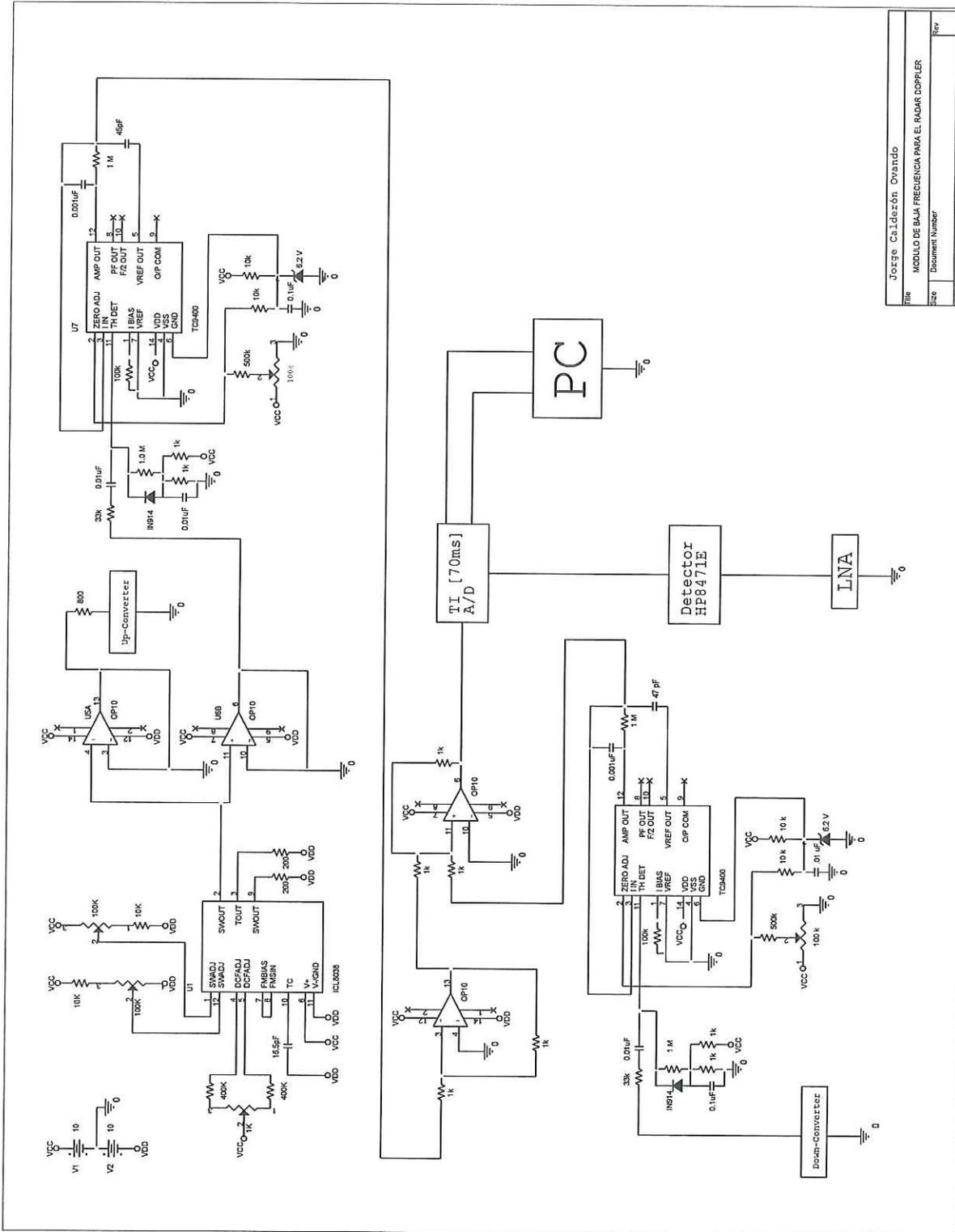
Para la "primera" etapa del oscilador se debe de tomar en cuenta, la respuesta esperada, como se dio anteriormente, este oscilador estará generando una frecuencia de 55 KHz, la cual se adecua perfectamente a las especificaciones del demodulador TC9400, por otro lado, un parámetro igualmente importante es el nivel de voltaje de salida. el cual sera de el 20% de el voltaje de alimentación, que para el diseño, esta propuesto de 10 V. por lo tanto se tendrá una salida de 2 Vpp , el paso por los amplificadores operacionales, idealmente no debe modificar significativamente este valor Solo hay que tener en consideración la cantidad de potencia que pudiera en dado caso manejar el Up-Converter el cual requiere una potencia superior a 5 dBm considerando la impedancia tan baja de entrada de 50 Ohms, se debe de utilizar una resistencia que limite la corriente de aproximadamente 800 Ω , de esta manera se estaría manejando un máximo de 3 mW aproximadamente en dBm tenemos:.

$$P[dBm] = 20 \log \left(\frac{3mW}{1mW} \right) \simeq 9dBm$$

La entrada de los demoduladores TC9400, esta especificada para una diferencia de potencial entre 0 V y 5 V y da un salida proporcional a:

$$V_{Out} = \frac{V_{DD} + V_{CC}}{2} \pm 400mV \simeq 5.5V$$

Nivel suficiente para que la señal pase por los Amplificadores operacionales y entre al convertidor A/D para ser procesado.



File	Jorge Calderón Ovando
Size	Document Number
Doc#	UMR05021_010-20-2000
Sheet	1 of 1

Anexo II. PRESUPUESTO TOTAL DEL SISTEMA.

A continuación se presenta el presupuesto total calculado para el sistema de radar propuesto, solo cabe mencionar que en el presupuesto solo están incluidos dispositivos y conexiones, pero gastos como impuestos y gastos de envío no fueron tomados en cuenta.

Componente	Precio [U.S. Dls]
1 Oscilador de baja frecuencia INTERSIL Modelo ICL8038	45.00
1 Oscilador de alta frecuencia EMF Modelo 512014 serie 500	250.00
1 Mezclador MARKI MICROWAVE serie M1-0204	450.00
1 Mezclador MITEQ SSB Upconverter Modelo SDM0204LC1MD	2,480.00
2 Filtros LARK ENGINEERING Co. Modelo 283650-300-3AA	485.00
1 Amplificador Potencia Media , MINI-CIRCUITS Modelo ZHL-1042J	495.00
1 Amplificador de Bajo Ruido, MICROWAVE DB, Modelo C020040D-4B1.	601.00
2 Alimentadores CHAPARRAL Modelo PR-1E	250.00
2 Divisores de Potencia MINI-CIRCUITS Modelo ZFSC-2-10G	140.00
1 Circuladores DITOM MICROWAVE, Modelo D3C2040	370.00
2 Adaptadores Guía de Onda-Coaxial SMA , MDL modelo 284AC86	165.00
1 Detector HP8471E	280.00
2 Parabolas de 2 metros de diámetro.	400.00
3.5 m de cable coaxial SEMFLEX serie SW	50.00
30 conectores SEMFLEX SMA	60.00
2 Demoduladores TELCOM TC9400	50.00
4 Amplificadores Operacionales ANALOG DEVICES OP-10	60.00
1 Convertidor A/D de dos canales Texas Instruments	90.00
1 Computadora Personal	1000.00
1 Fuente de Alimentación Protek Modelo 303	190.00
Componentes Diversos (resistores, diodos, capacitancias, cable, etc.)	200.00
Costo Total Aproximado	8,111,00

Anexo III. PROGRAMAS EN MATLAB PARA LA REALIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS PRESENTADOS.

Radar y la Superficie del Mar.

```

clear
x=0;
x2=0;
for long=0.001:0.2:20.1
x=x+1;
a(x)=long;
y=0;
for prof=0.001:50.1;
y=y+1;
b(y)=prof;
z(x,y)=((9.81./((2*pi)./a(x))).*tanh(((2*3.14)./a(x)).*b(y))).^0.5;
end
end
for vel=0:6
x2=x2+1;
v(x2)=vel;
y2=0;
for freq=1:100000000:1e10
y2=y2+1;
fo(y2)=freq;
fd(x2,y2)=(2*v(x2)*fo(y2))/3e8;
end
end
figure(1)
surf(b,a,z)
axis([0,50,0,20,0,6])
xlabel('Profundidad [m]')
ylabel('Longitud de Onda en Olas de Mar [m]')
zlabel('Velocidad [m/s]')
figure(2)
surf(fo,v,fd)
xlabel('Frecuencia de Transmisión [Hz]')
ylabel('Velocidad [m/s]')
zlabel('Frecuencia Doppler [Hz]')

```

Diseño del Radar

```

clear
x=0;
x2=0;
for diam=1:5
x2=x2+1;
a(x2)=diam;
y2=0;
for freq=1e9:100000000:1e10
y2=y2+1;
fo(y2)=freq;
go(x2,y2)=10*log(6*(pi*(a(x2)^2/4)/((2.9997e8)/fo(y2))^2));
end
end
figure(1)
surf(fo,a,go)
%axis([1,10,0,5,100,300])
xlabel('Frecuencia de Transmisión [Hz]')
ylabel('Diametro de la Antena [m]')
zlabel('Ganancia [dB]')
clear
x=0;
x2=0;
for diam=1:5
x2=x2+1;
a(x2)=diam;
y2=0;
for freq=2e9:100000000:1e10
y2=y2+1;
fo(y2)=freq;
Eo(x2,y2)=70*(((2.9997e8)/fo(y2))/a(x2));
end
end
figure(1)
surf(fo,a,Eo)
%axis([1,10,0,5,100,300])
xlabel('Frecuencia de Transmisión [Hz]')
ylabel('Diametro de la Antena [m]')
zlabel('Angulo Plano Horizontal [°]')
clear
x=0;
x2=0;
for diam=1:5

```

```

x2=x2+1;
a(x2)=diam;
y2=0;
for freq=2e9:100000000:1e10
y2=y2+1;
fo(y2)=freq;
Eo(x2,y2)=75*(((2.9997e8)/fo(y2))/a(x2));
end
end
figure(1)
surf(fo,a,Eo)
%axis([1,10,0,5,100,300])
xlabel('Frecuencia de Transmisión [Hz]')
ylabel('Diametro de la Antena [m]')
zlabel('Angulo Plano Vertical [°]')
clear
x=0;
x2=0;
for dist=1:10:1000
x2=x2+1;
a(x2)=dist;
y2=0;
for freq=3.5e9:100000000:1e10
y2=y2+1;
fo(y2)=freq;
angE=(75*(((2.9997e8)/fo(y2))/2.5))/2;
angH=(70*(((2.9997e8)/fo(y2))/2.5))/2;
lv=(2*(a(x2)*tan((2*pi*angE)/360)));
lh=(2*(a(x2)*tan((2*pi*angH)/360)));
Ao(x2,y2)=lv*lh;
end
end
figure(1)
surf(fo,a,Ao)
%axis([1,10,0,5,100,300])
xlabel('Frecuencia de Transmisión [Hz]')
ylabel('Distancia al Blanco [m]')
zlabel('Área total de Iluminación [m^2]')

```

Respuesta del Sistema

```

clear
x=0;

```

```

x2=0;
for long=0.001:0.2:20.1
x=x+1;
a(x)=long;
y=0;
for prof=0.001:50.1;
y=y+1;
b(y)=prof;
z(x,y)=((9.81./((2*pi)./a(x))).*tanh(((2*3.14)./a(x)).*b(y))).^0.5;
end
end
y2=0;
for vel=0:6
x2=x2+1;
v(x2)=vel;
freq=3.65e9;
y2=y2+1;
fd(y2)=(2*v(x2)*freq)/3e8;
end
figure(2)
plot(v,fd)
title('Respuesta a una Frecuencia de Transmisión de 3.65GHz')
xlabel('Velocidad [m/s]')
ylabel('Frecuencia Doppler [Hz]')
clear
x=0;
x2=0;
y2=0;
for dist=1:10:1000
x2=x2+1;
a(x2)=dist;
freq=3.65e9;
y2=y2+1;
fo(y2)=freq;
angE=(75*(((2.9997e8)/fo(y2))/2.5))/2;
angH=(70*(((2.9997e8)/fo(y2))/2.5))/2;
lv=(2*(a(x2)*tan((2*pi*angE)/360)));
lh=(2*(a(x2)*tan((2*pi*angH)/360)));
Ao(x2)=lv*lh;
end
figure(1)
plot(a,Ao)
title('Respuesta a una Frecuencia de Transmisión 3.65GHz')
xlabel('Distancia al Blanco [m]')

```

```

ylabel('Área total de Iluminación [m^2]')
clear
x=0;
x2=0;
for dist=500:10:1500
x2=x2+1;
a(x2)=dist;
y2=0;
freq=3.65e9;
for angulo=0.01:70
teta=2*pi*(angulo)/360;
y2=y2+1;
anguloc(y2)=angulo;
angu(y2)=teta;
angE=(75*(((2.9997e8)/freq)/2.5));
angH=(70*(((2.9997e8)/freq)/2.5));
lv=(2*(a(x2)*tan((2*pi*(angE/2))/360)));
lh=(2*(a(x2)*tan((2*pi*(angH/2))/360)));
Ao(x2,y2)=lv*lh;
%Calculos para el Angulo E
tetaE=(2*pi*((180-angE)/2)/360);
betaE=(1.571-angu(y2));
A1=(3.142-betaE-tetaE);
A2=1.571-A1;
alturaE=a(x2)*sin(A2);
lc1=a(x2)/cos((2*pi*(angE)/360)/2);
lc2=alturaE/sin(betaE);
d1=lc2*(cos((2*pi*(angE)/360)/2));
lc3=lc2+((lv/(sin(betaE-(2*pi*(angE)/360))))*sin(3.142-tetaE-betaE));
d2=lc3*(cos((2*pi*(angE)/360)/2));
dc1=a(x2)-d1;
dc2=d2-a(x2);
l1=dc1/sin(A1);
l2=dc2/cos(A2);
lt=l1+l2;
%Calculos para el Angulo H
tetaH=(2*pi*((180-angH)/2)/360);
betaH=(1.571-angu(y2));
A1=(3.142-betaH-tetaH);
A2=1.571-A1;
alturaH=a(x2)*sin(A2);
lc1=a(x2)/cos((2*pi*(angH)/360)/2);
lc2=alturaH/sin(betaH);
d1=lc2*(cos((2*pi*(angH)/360)/2));

```

```

lc3=lc2+((lv/(sin(betaH-(2*pi*(angH)/360)))*sin(3.142-tetaH-betaH)));
d2=lc3*cos((2*pi*(angH)/360)/2);
lh1=(2*(d1*tan((2*pi*(angH)/360)));
lh2=(2*(d2*tan((2*pi*(angH)/360)));
%Area Total
AT(x2,y2)=((lh1+lh2)/2)*lt;
%calculo de la densidad de potencia
DP(x2,y2)=30/(((lh1+lh2)/2)*lt);
end
end
figure(1)
surf(anguloc,a,DP)
xlabel('Angulo Incidencia [°]')
ylabel('Distancia al Blanco [m]')
zlabel('Densidad de Potencia [dBm/m^2]')
figure(2)
contourf(anguloc,a,DP)
xlabel('Angulo Incidencia [°]')
ylabel('Distancia al Blanco [m]')
zlabel('Densidad de Potencia [dBm/m^2]')

```

