



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**El Radar como Instrumento para Medición
de Precipitación**

Tesis Profesional

Que para obtener el título de :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a :

GLORIA MATA HERNANDEZ

Director: Ing. Francisco Soria Villegas

México, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

FIGURAS	i
TABLAS	iv
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. ANTECEDENTES HISTORICOS	
1. DESARROLLO DE LA TECNICA DE RADAR	3
2. EL RADAR COMO INSTRUMENTO METEOROLOGICO	9
CAPITULO II. DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS GENERALES DE UN SISTEMA DE RADAR	
1. FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UN SISTEMA DE RADAR	12
2. PARTES PRINCIPALES DE UN RADAR	14
2.1 TRANSMISOR-RECEPTOR	14
2.2 INDICADORES	16
2.3 ANTENA	17
3. CARACTERISTICAS DE LA ENERGIA ELECTROMAGNETICA	19
4. BANDAS DE FRECUENCIA	20
5. CARACTERISTICAS DEL HAZ DEL RADAR	23
5.1 LONGITUD DEL PULSO	23
5.2 FRECUENCIA DE REPETICION DEL PULSO (PRF)	25
5.3 ANCHO DEL HAZ	27
5.4 RESOLUCION ANGULAR POR ENSANCHAMIENTO DEL HAZ	28
6. DETECCION DE OBJETOS Y PROPAGACION DEL HAZ DEL RADAR	31
6.1 BLANCOS DE GRANDES SUPERFICIES	32
6.2 ECOS FIJOS O DE TIERRA	32
6.3 BLANCOS METEOROLOGICOS	32
6.4 NUBES	33
6.5 LLUVIA	33
6.6 NIEVE Y HIELO	34
6.7 PROPAGACION ANOMALA	35
6.8 SUPERREFRACCION, SUBREFRACCION Y ENTUBAMIENTO	35
6.9 LINEAS FINAS Y ANGELES	36
6.10 CONFETI	37
6.11 PROPAGACION DEL HAZ EN LA ATMOSFERA	38

CAPITULO III. DESCRIPCION FISICA DEL SISTEMA DE RADAR METEOROLOGICO BANDA C TIPO WSR-74C

1.	DESCRIPCION GENERAL	44
2.	CONSOLA DE OPERACION (UNIDAD 1)	44
2.1	INDICADOR A	47
2.1.1	DESCRIPCION DEL INDICADOR A	47
2.2	INDICADOR DE POSICION EN PLANO: PPI	53
2.2.1	DESCRIPCION DEL PPI	53
2.3	INDICADOR DE ALTURA Y DISTANCIA: RHI	62
2.3.1	DESCRIPCION DEL RHI	62
2.4	PROCESADOR E INTEGRADOR DE VIDEO DIGITAL: DVIP	68
2.4.1	DESCRIPCION DEL DVIP	73
2.4.2	INTEGRACION: TECNICAS DE PROMEDIO	74
2.5	AMPLIFICADORES-DISTRIBUIDORES	87
2.6	DIAGRAMA DE TIEMPOS DE LAS SEÑALES PRINCIPALES	88
3.	TRANSMISOR-RECEPTOR (UNIDAD 2)	90
3.1	DESCRIPCION DEL TRANSMISOR	90
3.2	DESCRIPCION DEL RECEPTOR	101
4.	ANTENA-PEDESTAL (UNIDAD 3)	105
5.	SERVO (UNIDAD 4)	105
5.1	SUBSISTEMA SERVO DE AZIMUT	108
5.2	SUBSISTEMA SERVO DE ELEVACION	113
6.	UNIDAD FIJA DE PRESURIZACION (UNIDAD 5)	113

CAPITULO IV. MEDICION DE LA PRECIPITACION POR MEDIO DE RADAR

1.	METODOS DE MEDICION DE LA PRECIPITACION CON RADAR	114
1.1	MEDICION DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACION A PARTIR DE LA REFLECTIVIDAD	114
1.2	MEDICION DE LA PRECIPITACION POR LA ATENUACION DE LAS ONDAS DE RADIOFRECUENCIA	115
1.3	MEDICION DE LA PRECIPITACION POR LA VARIACION DE LA REFLECTIVIDAD CON LA LONGITUD DE ONDA	115
1.4	MEDICION DE LA PRECIPITACION POR LA TEMPERATURA DE LA RADIACION DE MICROONDAS	115
1.5	MEDICION DE LA PRECIPITACION POR MEDIO DE RADAR - DOPPLER	116

2.	DESARROLLO DE LA ECUACION DEL RADAR	116
3.	RELACION Z-I	127
4.	VARIACIONES DE LA ECUACION DEL RADAR	131
4.1	ECUACION DEL RADAR TOMANDO EN CUENTA LA ATENUACION .	131
4.2	ECUACION DEL RADAR PARA LA DETECCION DE BLANCOS -- COMPLEJOS	137

CAPITULO V. CALIBRACION DEL SISTEMA DE RADAR

1.	CONCEPTOS GENERALES	142
2.	CALIBRACION GENERAL DEL SISTEMA	144
2.1	MEDICION DE PARAMETROS	144
2.2	CALIBRACION ELECTRONICA	144
3.	CALIBRACION DEL RADAR CON UN BLANCO CONOCIDO ..	148
4.	CALIBRACION DEL RADAR CON PLUVIOMETROS	149
4.1	TECNICA BASADA EN LA DETERMINACION DE FACTORES DE AJUSTE	150
4.2	DESCRIPCION DE LAS TECNICAS DE CAMPO	152
4.3	COMPARACION DE LAS TECNICAS	159
4.4	TECNICA DE CALIBRACION REALIZADA EN LA ESTACION DE RADAR DE TAMPICO	162
5.	CALIBRACION DEL RADAR AJUSTANDO LA RELACION Z-I	169
5.1	METODOS GENERALES	169
5.2	TECNICA DE OPTIMIZACION	171
5.2.1	FUNCIONES DE CRITERIO (CTF)	173

CAPITULO VI. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE RADAR METEOROLOGICO

1.	INTRODUCCION	176
2.	CONFIGURACION FISICA DEL SISTEMA	176
3.	PROCESO DE DATOS	180
3.1	VOLUMEN DE INFORMACION	180
3.2	CONVERSION DE COORDENADAS	183
3.3	MAPAS DE INTENSIDAD A ALTITUD CONSTANTE (CAPPI)	185
3.4	MAPAS DE ALTURA MAXIMA DE ECOS	190
4.	DETERMINACION DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACION	190

APENDICE A	193
APENDICE B	195
APENDICE C	197
BIBLIOGRAFIA	199

F I G U R A S

FIGURA	II.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN RADAR METEOROLOGICO	15
FIGURA	II.2	PATRON DE RADIACION TIPICO DE UNA ANTENA PARABOLICA CIRCULAR	18
FIGURA	II.3	FRECUENCIAS DE RADAR EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	22
FIGURA	II.4	EFEECTO DE LA LONGITUD DEL PULSO EN LA RESOLUCION DEL RADAR	24
FIGURA	II.5	SECCION TRANSVERSAL DEL HAZ PRODUCIDO POR UN REFLECTOR PARABOLICO	27
FIGURA	II.6	RESOLUCION ANGULAR Y ENSANCHAMIENTO DEL HAZ	29
FIGURA	II.7	ENSANCHAMIENTO TEORICO DEL HAZ DEL RADAR	30
FIGURA	II.8	ILUSTRACION DE LA "BANDA BRILLANTE" A 8000 ft EN EL INDICADOR RHI	35
FIGURA	II.9	TRES TIPOS DE PROPAGACION ANOMALA EN EL RADAR	37
FIGURA	II.10	TRAYECTORIA DEL HAZ EN LA ATMOSFERA	39
FIGURA	II.11	PROYECCION DEL HAZ CON EL RADIO TERRESTRE CORREGIDO	40
FIGURA	II.12	PROYECCION DE ALTURA Y DISTANCIA DE UN BLANCO CON RESPECTO AL RADAR	41
FIGURA	II.13	INTERCEPCION DEL HAZ CON UN ECO	42
FIGURA	III.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS UNIDADES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE RADAR	45
FIGURA	III.2	PRESENTACION DE LA CONSOLA DE OPERACION	46
FIGURA	III.3	PRESENTACION DEL INDICADOR A Y FOTOGRAFIA DE UN ECO EN LA PANTALLA	48
FIGURA	III.4	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL INDICADOR A	51
FIGURA	III.5	PRESENTACION DEL INDICADOR PPI	54
FIGURA	III.5a	FOTOGRAFIAS DE ECOS EN EL INDICADOR PPI	55
FIGURA	III.6	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PPI	58
FIGURA	III.7	PRESENTACION DEL INDICADOR RHI	63
FIGURA	III.7a	FOTOGRAFIA DEL ECO DE UNA TORMENTA EN EL RHI	64
FIGURA	III.8	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RHI	66
FIGURA	III.9	ALTURA DE UN ECO EN EL RHI, CON Y SIN CORRECCION ECC	67

FIGURA III.10	PRESENTACION DEL DVIP	69
FIGURA III.11	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DVIP	72
FIGURA III.12	FOTOGRAFIAS DE PULSOS DE RADAR CONSECUTIVOS	76
FIGURA III.13	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL INTEGRADOR DIGITAL	77
FIGURA III.14	FILTRO DIGITAL PASO BAJA PARA LA INTEGRACION EN -- TIEMPO	78
FIGURA III.15	CURVAS DE PROMEDIO PARA DIFERENTES VALORES DE "B" .	79
FIGURA III.16	ESQUEMA DEL PROMEDIO EN TIEMPO	80
FIGURA III.17	DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA OPERACION DE LA INTEGRA CION EN DISTANCIA Y TIEMPO	82
FIGURA III.18	TONALIDADES DE LOS SEIS NIVELES DE INTENSIDAD	86
FIGURA III.19	DIAGRAMA DE TIEMPOS DE LAS SEÑALES PRINCIPALES	89
FIGURA III.20	CABINA DEL TRANSMISOR-RECEPTOR	91
FIGURA III.21	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRANSMISOR	92
FIGURA III.22	DIAGRAMA DE TIEMPOS DE DISPARO DEL MODULADOR	95
FIGURA III.23	SECCION TRANSVERSAL DE UN MAGNETRON	97
FIGURA III.24	DUPLEXER BALANCEADO USANDO TUBOS DOBLES TR Y DOS -- JUNTURAS HIBRIDAS	99
FIGURA III.25	ESQUEMA DEL ACOPLADOR BIDIRECCIONAL	100
FIGURA III.26	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RECEPTOR	102
FIGURA III.27	MEZCLADOR BALANCEADO	103
FIGURA III.28	PRESENTACION DE LA ANTENA-PEDESTAL	106
FIGURA III.29	CABINA DE LA UNIDAD DEL SERVO	107
FIGURA III.30	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SERVO DE AZIMUT	109
FIGURA III.31	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SERVO DE ELEVACION	112
FIGURA IV.1	PATRONES DE RADIACION DE UNA ANTENA ISOTROPICA Y DI RECCIONAL	118
FIGURA IV.2	HAZ DEL RADAR MOSTRANDO EL VOLUMEN V_m	121
FIGURA IV.3	INTERCEPCION DEL HAZ CON UN BLANCO, CONDICIONES EN QUE SE APLICA LA ECUACION DEL RADAR	126
FIGURA IV.4	GRAFICA DE LAS RELACIONES Z-I. LA MAS GENERALIZADA ES $Z = 200 I^{1.6}$	130
FIGURA IV.5	DEPENDENCIA DE LA ATENUACION CON LA LONGITUD DE ON- DA PARA EL OXIGENO Y VAPOR DE AGUA	133
FIGURA V.1	COMPARACION DEL VOLUMEN DE PRECIPITACION DETECTADO CON RADAR Y PLUVIOGRAFO	149

FIGURA	V.2	COMPARACION DE ESTIMACIONES DE PLUVIOGRAFOS Y RADAR PARA UN PERIODO DE 93 DIAS	151
FIGURA	V.3	ANALISIS DE ISOYETAS	153
FIGURA	V.4	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE AGUA A PARTIR DE LAS MEDICIONES DE RADAR	155
FIGURA	V.5	REJILLA EN EL AREA DE PRUEBA EN COORDENADAS POLARES	156
FIGURA	V.6	RELACION DE PESO DEL PLUVIOGRAFO A DIFERENTES DISTANCIAS Y VALORES DE "EP"	157
FIGURA	V.7	DIFERENCIAS ENTRE ESTIMACIONES DE LLUVIA RELACIONADAS CON UNA RED DE PLUVIOGRAFOS DE DENSIDAD VARIABLE	161
FIGURA	V.8	LOCALIZACION DE LA ESTACION DE RADAR	163
FIGURA	V.8a	PLANTILLA CUADRICULADA DE LA ZONA QUE CUBRE EL RADAR DE TAMPICO	164
FIGURA	V.9	EJEMPLO DE UNA PLANTILLA CON EL VACIADO DE DATOS - CLAVE	166
FIGURA	V.10	GRAFICA PARA DETERMINAR EL FACTOR DE CORRELACION .	167
FIGURA	V.11	GRAFICA OBTENIDA DEL ANALISIS DE REGRESION PARA LA RELACION Z-I	170
FIGURA	V.12	a) VARIACION EN LA RELACION I-Z. b) COMPARACION DE ESTIMACIONES DE RADAR Y PLUVIOGRAFO DE CANTIDADES DE LLUVIA HORARIA. VARIACION PARA AJUSTAR A LA LINEA 1:1	174
FIGURA	VI.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UNA ESTACION DE RADAR AUTOMATICA	178
FIGURA	VI.2	DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA DENSIDAD NO UNIFORME AL CONVERTIR COORDENADAS POLARES A RECTANGULARES	184
FIGURA	VI.3	SEGMENTOS HORIZONTALES QUE CONFIGURAN EL CAPPI ...	186
FIGURA	VI.4	MAPA CAPPI A 1.5 KM	187
FIGURA	VI.5	HAZ DEL RADAR A DIFERENTES ANGULOS DE ELEVACION ..	189

T A B L A S

TABLA	II.1	NOMENCLATURA DE BANDAS CON LETRAS PARA FRECUENCIAS DE RADAR	21
TABLA	III.1	CONTROLES DEL INDICADOR A	49
TABLA	III.2	CONTROLES DEL PPI	56
TABLA	III.3	CONTROLES DEL RHI	65
TABLA	III.4	CONTROLES DEL DVIP	70
TABLA	IV.1	$I_m(-K)$ EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y LONGITUD DE ONDA	134
TABLA	IV.2	FACTOR DE ATENUACION K_1 (dB/Km/gr/m ³)	135
TABLA	V.1	REPORTE DE MANTENIMIENTO DE RADARES	145
TABLA	V.2	VALORES DEL FACTOR DE REFLECTIVIDAD Z PARA LOS SEIS NIVELES DE INTENSIDAD DE PRECIPITACION	146
TABLA	V.3	POTENCIA RECIBIDA DE LOS SEIS NIVELES Y LA CORRESPONDIENTE DEL GENERADOR DE SEÑALES	147
TABLA	V.4	CONSTANTE DE PESO "EP" (EN Km ²)	157
TABLA	V.5	COMPARACION DEL ERROR PROMEDIO EN ESTIMACIONES DE RADAR AJUSTADAS CON PLUVIOGRAFOS EN DIFERENTES EXPERIMENTOS	160
TABLA	V.6	CLAVES PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR DE CORRELACION	165
TABLA	V.7	FUNCIONES DE CRITERIO "CTF"	175
TABLA	VI.1	DISTANCIAS DE RADAR A LAS QUE SE ALCANZA 30 KM DE ALTITUD	182

I N T R O D U C C I O N

El Sistema de Radar Meteorológico es un instrumento electrónico-me cánico que se utiliza entre otras cosas, para la medición de la in tensidad de lluvia, presentando información detallada y continua-- mente actualizada de la precipitación dentro de la cobertura del - haz del radar, principalmente en tres tipos de indicadores.

El Sistema de Radar se basa en el principio de transmisión de pul sos de energía concentrados en un haz muy angosto. Los objetos -- que interceptan dicha energía la dispersan y la señal recibida en la antena es detectada y amplificada en un receptor para ser pre-- sentada en las pantallas como señal de video.

Cuenta con una unidad que digitaliza e integra la señal de video - para determinar seis niveles de intensidad de precipitación, asi - mismo, tiene salidas para ser interconectadas a una computadora y aumentar los niveles para una mejor resolución en la medición de - la intensidad.

La forma básica y principal mediante la cual se puede cuantificar la intensidad de precipitación es calibrando el sistema de acuerdo a dos relaciones empíricas entre la potencia recibida, la cual de pende de varios parámetros del equipo y el factor de reflectividad de las partículas de lluvia, que está en función directa con la in tensidad de precipitación.

Otros métodos de calibración con los que se obtienen mejores resul tados involucran técnicas de análisis de regresión a partir de da tos de radar y datos de una red de pluviógrafos, asi como de facto res de calibración con los mismos conjuntos de datos.

Una mejor técnica de calibración consiste en programar una computa dora con el objeto de que controle automáticamente todo el equipo de radar, reciba y almacene la información de los 'ecos', interro gue algunos pluviómetros para calibrar el radar además de calcular y presentar con gran exactitud las láminas de lluvia a intervalos de tiempo especificados en toda el área cubierta por el radar.

Se han desarrollado otros métodos de calibración específicos. Sin embargo, debido al equipo sofisticado de que hacen uso y otras limitaciones, han quedado sólo como pruebas experimentales.

C A P I T U L O I

ANTECEDENTES HISTORICOS

1. DESARROLLO DE LA TECNICA DEL RADAR

Dentro del desarrollo de las investigaciones sobre sistemas de comunicaciones, surgió la técnica del radar, palabra formada con las iniciales de las palabras "Radio Detection and Ranging" lo que traducido sería "detección y localización por medio de señales de radio", y muchos investigadores han contribuido a su desarrollo.

En septiembre de 1922 dos investigadores de la Armada de los Estados Unidos fueron encargados para hacer pruebas sobre comunicaciones de radio a altas frecuencias; en sus experimentos ellos notaron que cuando un barco interceptaba el haz de propagación se interrumpían las señales entre el transmisor y el receptor. Como existía el problema en las fuerzas navales sobre la penetración de otros barcos en sus bases, ya fuera en las noches o cuando había niebla, -- fué conveniente seguir con las investigaciones sobre la interferencia de las señales producidas por obstáculos, objetivo que distanció mucho las investigaciones de lo que inicialmente se había propuesto. La aplicación directa a la que se llegó fué la detección de barcos enemigos, proponiéndose entonces que los transmisores y receptores de radio de alta frecuencia se instalaran en buques de guerra para detectar el cruce de otros barcos entre los que estaban en contacto por radio.

Esto no fué propiamente el radar; el equipo aún no contenía los mecanismos para detectar las señales de radio dispersadas por obstáculos, por lo que se utilizó únicamente para detectar los objetos en movimiento entre un transmisor y un receptor.

Siete años después, en junio de 1930 se hicieron experimentos para desarrollar una técnica de búsqueda de dirección mediante radios de alta frecuencia, los resultados observados fueron severas alteraciones del campo de propagación debido a un avión volando sobre ellos. De nuevo la aplicación fué obvia. Se propuso que los radios de alta frecuencia fueran usados para prevenir sobre el acercamiento de aviones.

En enero de 1931 en Washington D.C. se estableció un proyecto para la detección de aviones y barcos enemigos por medio de señales de radio. Esto fué años antes de que los principios de radar fuesen totalmente entendidos e implementados. En forma simplificada el principio de la técnica del radar puede describirse como sigue:

- La Radiación Electromagnética de alta frecuencia es utilizada para detectar y localizar objetos remotos con características reflejantes.
- La radiación es emitida en pulsos de unos pocos microsegundos de duración, separados por intervalos - cuya duración es muchas veces mayor que la duración del pulso.
- Los pulsos son dispersados por los objetos reflejantes y las señales recibidas son detectadas y presentadas en el equipo receptor, localizado en el mismo sitio de transmisión.
- La distancia hasta los objetos detectados es determinada midiendo el tiempo que tardan los pulsos -- en alcanzar los blancos, a partir del punto de transmisión así como el tiempo que tardan en regresar.
- Las direcciones hacia los blancos son determinadas mediante el uso de antenas altamente direccionales.

Mientras no se cumplieran las condiciones anteriores no sería posible la integración de un sistema de radar propiamente dicho. Muchos investigadores de diversos países habrían de contribuir para establecer definitivamente la técnica del radar.

El radar se apoyó en ciertos elementos contemporáneos para su desarrollo siendo el más importante el tubo de rayos catódicos, el cual estuvo disponible como una herramienta de laboratorio desde cerca de 1930, y de hecho el radar no sería posible sin este tubo de vacío.

En los Estados Unidos los investigadores de radar estudiaron el método "beat" o de onda continua. Con este método, el transmisor

y receptor fueron separados ampliamente y protegidos uno de otro. Para la transmisión se usaron ondas continuas y en el receptor las señales fluctuantes llamadas "beats" fueron observadas cuando un aeroplano volaba a través del campo de propagación de las ondas de radio. Se obtuvo un rango de observación de 40 millas.

La separación del transmisor y receptor requerida para la operación del método "beat" permitió su instalación en barcos. Su utilidad en otros lugares estuvo limitada a la protección de grandes áreas terrestres como las ciudades y las bases militares. Hasta 1934 se sugirió que se trabajara e investigara el método de pulsos. El primer paso fue construir un indicador para presentar las salidas del transmisor y receptor, para esto se utilizó un osciloscopio comercial de rayos catódicos. El siguiente paso fue desarrollar un transmisor de pulsos. Se escogió la frecuencia de 60 MHz del transmisor debido a que ya se había usado en los experimentos con el método "beat", la antena fue un solo reflector resonante y la potencia del pulso fue estimada de 100 a 200 W. De lo anterior surgió la duda en cuanto a que si la energía del eco podría ser detectada durante los intervalos entre los pulsos transmitidos.

Se utilizó un receptor de comunicaciones experimental de alta ganancia y amplio ancho de banda el cual se le conectó una antena similar a la del transmisor. Cuando un pequeño aeroplano voló atravesando el haz a una distancia de cerca de 1 milla, la señal del pulso transmitido causó que en el medidor conectado a la salida del receptor hubiera una fluctuación violenta entre cero y saturación. Fue evidente que las señales de los ecos si podrían ser detectadas durante los intervalos entre los pulsos transmitidos. De esta forma se trató de desarrollar inmediatamente un receptor de radar práctico.

El radar impuso requerimientos en el receptor que no fueron encontrados con los receptores de radio convencionales de ese tiempo. La proximidad del transmisor y del receptor hizo que éste estuviera expuesto a una fuerte sobrecarga y para que recobrará su sensibilidad fue esencial un tiempo de recuperación de apenas algunos microsegundos.

Un segundo requerimiento fué minimizar el tiempo en que el receptor daba una señal oscilatoria en respuesta a un eco fuerte debido a la señal de alto nivel del transmisor. Esto se obtuvo rediseñando los circuitos del amplificador de tubo de vacío y limitando el nivel de excitación de los circuitos que serían afectados por el transmisor.

El tercer requerimiento fué la rápida respuesta del receptor para amplificar los pulsos cortos de los ecos. Esto se hizo sintonizando los circuitos para que las características del receptor se igualaran a las propiedades de transmisión de los pulsos.

También se tomaron precauciones extremas en el blindaje, filtrado y conexión a tierra en un punto común.

El nuevo sistema Naval estuvo listo para que fuera probado en abril de 1936. La sensibilidad del receptor se ajustó de manera que el pulso transmitido pareciera instantáneo y de esta forma fueron observadas definidas formas de ecos de aviones, tiempo después se alcanzó una distancia de 25 millas que era el límite del indicador.

A partir de aquí se hicieron experimentos en laboratorio. El principal objetivo fue reducir el tamaño del equipo para poder usarlo en barcos.

Esto significaba frecuencias más altas y antenas más pequeñas. En julio de 1936 un pequeño radar fué puesto en operación a una frecuencia de 200 MHz. En ese mismo mes el primer duplexer o tubo T/R fué probado, también a 200 MHz. El equipo se había habilitado para que el transmisor y receptor usaran la misma antena. Estos dos desarrollos hicieron posible colocar un radar en un barco para hacer pruebas en el mar.

Al igual que en muchas otras áreas, el interés y desarrollo del radar se extendió a Europa al mismo tiempo que en E.U. (1934). En Inglaterra, por ejemplo, el trabajo estuvo basado en el esfuerzo realizado desde 1924 y 1925 con el uso de señales de radio de alta frecuencia para medir la altura de las capas de Heavyside (una región de la atmósfera que refleja las señales de radio).

Aunque en 1939, Inglaterra, Alemania y los E.U. fueron los primeros países en el desarrollo del radar, los franceses fueron quienes hicieron la primera aplicación comercial en 1935.

Los científicos de la Sociedad Radioeléctrica de Francia iniciaron los estudios de la detección de obstáculos por medio de señales de radio en 1934 y la aplicación inmediata que tuvieron en mente fue la de evitar los naufragios y mejorar las operaciones de rescate de naufragos. El resultado fue la instalación en el transatlántico -- Normandie de un detector de obstáculos que trabajaba con ondas decimétricas y empleando pulsos de magnetron, esto fue en 1935. La operación fue satisfactoria y permitió que los investigadores de radar empezaran a instalar uno en el puerto de Le Havre en 1936. Este -- equipo serviría para la detección de barcos que entraran y abandonaran el puerto.

Las señales de radio reflejadas por aviones fueron observadas en -- Inglaterra por el año de 1930 y la posibilidad de detectar aviones se estudio durante 1934; esto fue realizado tan rapidamente que las señales de radio fueron la alternativa ideal para el inadecuado -- equipo de aviso y previsión acústico con que contaban en ese tiempo y el cual unicamente servía para escuchar el sonido de los motores del avión, teniendo muy poca distancia para prevenir su aproximación. En contraste, los experimentos indicaban que el radar daría un aviso oportuno cuando el enemigo volara alrededor de una distancia de 100 millas o más.

Mientras las naciones luchaban durante la segunda guerra mundial, la industria electrónica tuvo períodos de creatividad y crecimiento extraordinarios y en ese tiempo se formó una oficina dedicada a diseñar equipos para resolver problemas militares específicos y hacer -- más efectivo el uso del equipo ya existente.

Uno de estos equipos fueron los radares, los cuales se mejoraron en cuanto a la detección de aviones, interferencias producidas por las comunicaciones del enemigo, detección de barcos, control de armas -- de fuego, navegación y sistemas de identificación; muchos de ellos llegaron a instalarse en el sector civil.

Acerca de las técnicas de interferencia de radar desarrolladas en la guerra, una de las más simples y efectivas fué el "confeti", este fué hecho de tiras delgadas de aluminio o de latas, cortadas al tamaño justo para interferir a una determinada frecuencia. Una gran cantidad de estas tiras en el aire podrían interferir los radares enemigos produciendo retornos de energía masivos. Esto era barato y facil de transportar y sin tener que soltarlo al aire con precisión.

En 1940 Inglaterra y los Estados Unidos estuvieron comerciando con radares secretos que operaban con magnetrón, un tubo de alta frecuencia que generaba energía de microondas en transmisores de banda S (3,000 MHz). Los diseñadores requerían que la frecuencia de operación fueran tan alta como fuese posible ya que la resolución del radar (la habilidad para discriminar un solo blanco entre varios) era mejor en las altas frecuencias del espectro.

Desafortunadamente como la frecuencia aumentó, hubo atenuación atmosférica lo que limitó la distancia de máxima detección.

En los Estados Unidos los investigadores utilizaban el duplexer, un tipo de interruptor que permitía al transmisor y receptor de radar usar la misma antena, el comportamiento de ambos era electricamente mejor y se ahorrraba una segunda antena.

En 1941 la Unión Soviética creó radares para la detección de aviones; estos equipos operaban a 300 MHz. Japón en 1942, contó con sistemas similares. Los alemanes nunca obtuvieron radares de microondas, en contraste con Inglaterra y los Estados Unidos que los produjeron en grandes volúmenes.

En cuanto a las antenas de los radares, se seleccionaron platos parabólicos cuyo diámetro fué determinado por la frecuencia de operación. A más altas frecuencias se utilizarían antenas de diámetro más pequeño de tal forma que los investigadores tuvieron buenas razones, además de mejor resolución, para obtener frecuencias lo más altas que se pudiera, siendo posible reducir el tamaño del equipo e instalarlos en los aviones. Practicamente todos los avances en la técnica de radar durante esa época se generaron en el Laboratorio de Radiación del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en --

donde se desarrollaron técnicas de gran trascendencia para el campo de la electrónica y las comunicaciones.

Con el uso que se le dió a los sistemas de radar en los tiempos de la segunda guerra mundial un nuevo problema se presentaba en las pantallas indicadoras del radar. La gran cantidad de ecos nubosos que estaban presentes algunas veces, hacían imposible detectar con claridad aviones y barcos.

2. EL RADAR COMO INSTRUMENTO METEOROLÓGICO

Mientras en las bases militares se hacían esfuerzos para minimizar los ecos nubosos, por otro lado se fué reconociendo que la información meteorológica disponible por medio del radar sería un importante complemento para las técnicas de observación meteorológica normales ya que estos aparatos tenían la capacidad para detectar en un gran radio (hasta 450 km con ciertas limitaciones) las concentraciones de partículas atmosféricas (gotas de agua, nieve, granizo, etc) de cierto tamaño mostrando características tales como su extensión horizontal y vertical, movimiento, posición y la intensidad del eco recibido por el radar.

En 1947 el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos inició la instalación de radares militares modificados para aplicaciones meteorológicas principalmente en las áreas sujetas más frecuentemente a la actividad de tornados.

A causa de su baja potencia, características relativamente pobres del haz y falta de la capacidad de medición de intensidad del eco, estos radares fueron considerados un equipo sustituto provisional hasta que fuera diseñado uno específicamente para la observación meteorológica.

En 1959 estuvo disponible un radar denominado WSR-57 y a partir de entonces una amplia red de radares de gran potencia y buena sensibilidad se empezó a desarrollar, permitiendo analizar las situaciones que ocurrían durante lluvias intensas, pudiendo obtener valores cuantitativos de la precipitación, información sumamente útil para fines hidrológicos. Estos radares serían el equipo estándar

por muchos años manejados las 24 horas del día por observadores de radar, evaluando la presentación de los ecos e interpretando la información meteorológica obtenida de las pantallas.

Durante muchos años las técnicas de predicción meteorológica se han basado en la observación y asentamiento de las condiciones meteorológicas que se presentan en el último momento. En la mayor parte de los casos ésta representación se basa en observaciones puntuales.

A lo largo de los años las redes de observatorios se han expandido grandemente tanto en espacio como en tiempo y su desarrollo está a punto de alcanzar el límite de funcionalidad desde el punto de vista económico y de comunicación. Aún cuando fuese posible recibir oportunamente y representar todas estas observaciones trazando una carta del tiempo cada hora, no se obtendrían todos los detalles relevantes acerca de las condiciones meteorológicas en mesoescala requeridas para los pronósticos de precisión a corto plazo. Es en este aspecto que el radar se utiliza para presentar información detallada y continuamente actualizada del patrón de precipitaciones dentro de su cobertura. El radar puede considerarse como una red constituida por un número infinito de estaciones meteorológicas que continuamente comunican sus observaciones en forma fácilmente interpretable. Los radares meteorológicos en las bandas S, C, y X presentan principalmente, el campo de precipitaciones, además otros parámetros de interés para pronósticos locales tales como nubosidad y obstrucciones visuales están relacionadas intimamente con la precipitación cuando menos de manera cualitativa, por otro lado, la información de radar no reemplaza las observaciones convencionales sino que las complementa y por lo tanto, el usuario de la información de radar meteorológico deberá mantenerse bien informado sobre las condiciones meteorológicas a escala sinóptica* y mesoescala*, intimamente relacionadas con la información de radar.

La información recabada por los radares tiene características muy especiales, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

* La escala sinoptica abarca una longitud horizontal de 2000 Km en adelante y la mesoescala abarca una longitud de 2 hasta 2000 Km.

- Los radares presentan la información en coordenadas polares cuyo origen es la posición de la antena la cual es el dispositivo que hace el "rastreo" en el espacio atmosférico circundante.
- La información es actualizada en promedio cada 20 seg. en los radares meteorológicos modernos.
- El radar obtiene información no sólo de un plano sino de una sucesión de planos horizontales con los cuales se puede configurar el estado de la atmósfera en un volumen grandísimo.
- La información obtenida es afectada en mayor o menor grado por las condiciones atmosféricas, dependiendo esto de la longitud de las ondas de radio que transmite el radar y las cuales son reflejadas y desviadas por las nubes y las capas atmosféricas de diferente densidad.
- Los datos recabados por el equipo dependen cuantitativamente de la potencia máxima de las ondas de radio transmitidas, de su longitud de onda, de la frecuencia de repetición de los pulsos de ondas y de su duración, de las dimensiones y forma de la antena así como de la distancia entre el objeto detectado y la antena.

Los radares meteorológicos de uso más generalizado operan en longitudes de onda del orden de 10 cm ó de 5 cm. Otros equipos para observaciones meteorológicas operan en longitudes de 3 cm y hasta de 1 cm siendo sus aplicaciones más específicas y restringidas.

C A P I T U L O I I

DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS GENERALES DE UN SISTEMA DE RADAR

1. FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UN SISTEMA DE RADAR

El radar es relativamente simple en concepto aunque su implementación práctica no lo es así. Su principio de operación consiste en la radiación de energía electromagnética, la cual es retornada por los objetos reflejantes que la interceptan, llamados también "BLANCOS". La señal reflejada o "ECO" es recibida, detectada y presentada en las pantallas del radar.

El radar es un instrumento activo que utiliza su propia fuente de radiación controlada para detectar el blanco y sus características no depende de la energía radiada por el blanco como en los radiómetros o de la energía reflejada de fuentes no controladas como en una cámara óptica. La habilidad para detectar un blanco a grandes distancias y localizar su posición con relativamente alta exactitud son las dos grandes atribuciones del radar.

El principio del radar ha sido aplicado utilizando frecuencias desde pocos megahertz (MF) hasta frecuencias en la zona ultravioleta del espectro (como en el radar laser) lo cual representa un espectro de frecuencias de aproximadamente 100 GHz. Las técnicas particulares para implementar el radar difieren mucho según sea la frecuencia de operación pero el principio es el mismo.

El sistema de radar meteorológico es un instrumento electrónico-mecánico el cual se utiliza entre otras cosas para la medición de la intensidad de la lluvia, es decir, presenta información detallada y continuamente actualizada de la precipitación dentro de la cobertura del haz del radar.

La mayoría de los equipos de radar utilizados con fines meteorológicos son del tipo pulsante, los cuales transmiten pulsos de energía electromagnética de muy corta duración, del orden de 1 a 5 microsegundos. La antena del radar transmite esta energía concentrándola en un haz muy angosto, con un ancho de pocos grados (0.5°

a 2.5°). Los objetos que interceptan esta energía la dispersan en todas direcciones, regresando una pequeña porción a la antena en el intervalo de tiempo entre pulso y pulso. La señal reflejada -- por el objeto o blanco es detectada y amplificada en el receptor -- del radar y presentada para su observación en varias pantallas u -- otros dispositivos de registro.

El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción -- de la señal reflejada se utiliza para determinar la distancia del -- blanco ya que la velocidad a la que viaja la energía electromagné-- tica en ambos sentidos es igual a la de la luz. La antena gira -- tanto en azimut como en elevación para poder determinar la posi-- ción y altura del blanco.

Una clasificación general de los radares permite incluirlos en uno de dos grupos:

- a). Radares coherentes o radares Doppler
- b). Radares no coherentes.

En los radares coherentes la fase de la señal transmitida se conserva como señal de referencia para compararla posteriormente con la fase de la señal recibida. Los cambios de fase en la señal recibida son proporcionales a los cambios de frecuencia, ocasionados por blancos móviles. Por lo tanto, la componente radial de la velocidad de un blanco móvil puede determinarse con un radar de este tipo. Con estos sistemas se puede obtener el campo de vientos fuertes asociados con tormentas convectivas de diversa índole midiendo la velocidad de las partículas de estas nubes. Estos radares son utilizados experimentalmente para medir la velocidad de los vientos y la velocidad de caída de las partículas de las nubes.

Los radares no coherentes no tienen señal de referencia por lo que solamente se puede obtener la dirección y distancia del blanco con respecto al radar. Sin embargo, las fluctuaciones de la señal recibida por un radar no-coherente están relacionadas con el espectro de frecuencia Doppler pudiendo contener información sobre el movimiento de los blancos y podrían analizarse con equipo especial. La gran mayoría de los radares meteorológicos actualmente en uso --

son radares no-coherentes

2. PARTES PRINCIPALES DE UN RADAR

Todos los equipos de radar pulsantes independientemente de su diseño o aplicación están constituidos por los mismos componentes principales aunque en su construcción específica existen muchas variantes. La Figura II.1 muestra un diagrama de bloques general de un radar meteorológico.

2.1 TRANSMISOR-RECEPTOR

Un generador de sincronía produce pulsos eléctricos a intervalos de tiempo regulares, el transmisor genera a su vez un tren repetitivo de pulsos cortos de alta potencia mediante un oscilador tal como el magnetrón; son pulsados por el modulador y disparados por una línea de transmisión hacia la antena. En algunos radares el elemento amplificador de potencia es un Klystron, un tubo de onda viajante, un tubo de rejilla controlada o un amplificador de campo cruzado.

El duplexer permite utilizar una sola antena para la transmisión y recepción, quedando el receptor protegido de daños causados por la alta potencia generada por el transmisor. El duplexer sirve de canal para las señales de eco retornadas al receptor sin ir al transmisor. Un tipo de duplexer consiste de dos elementos de descarga de gas, uno conocido como TR (Transmite-recibe) y el otro como ATR (Antitransmite-recibe). El primero protege al receptor de daños por la presencia de energía de RF de alta potencia, tal y como se genera en el magnetrón durante la transmisión, mediante la ionización del gas en el tubo, produciendo un corto circuito a través de las terminales del receptor; entre pulso y pulso el tubo TR conecta el receptor a la antena y el tubo ATR desconecta al magnetrón para evitar pérdidas de la señal recibida. Algunas veces se utilizan como duplexer los circuladores de ferrita de estado sólido así como receptores protegidos con tubos TR de gas-plasma y/o diodos limitadores.

El receptor es generalmente del tipo superheterodino y puede separar la señal del eco deseado del ruido y de algunas señales de interferencia.

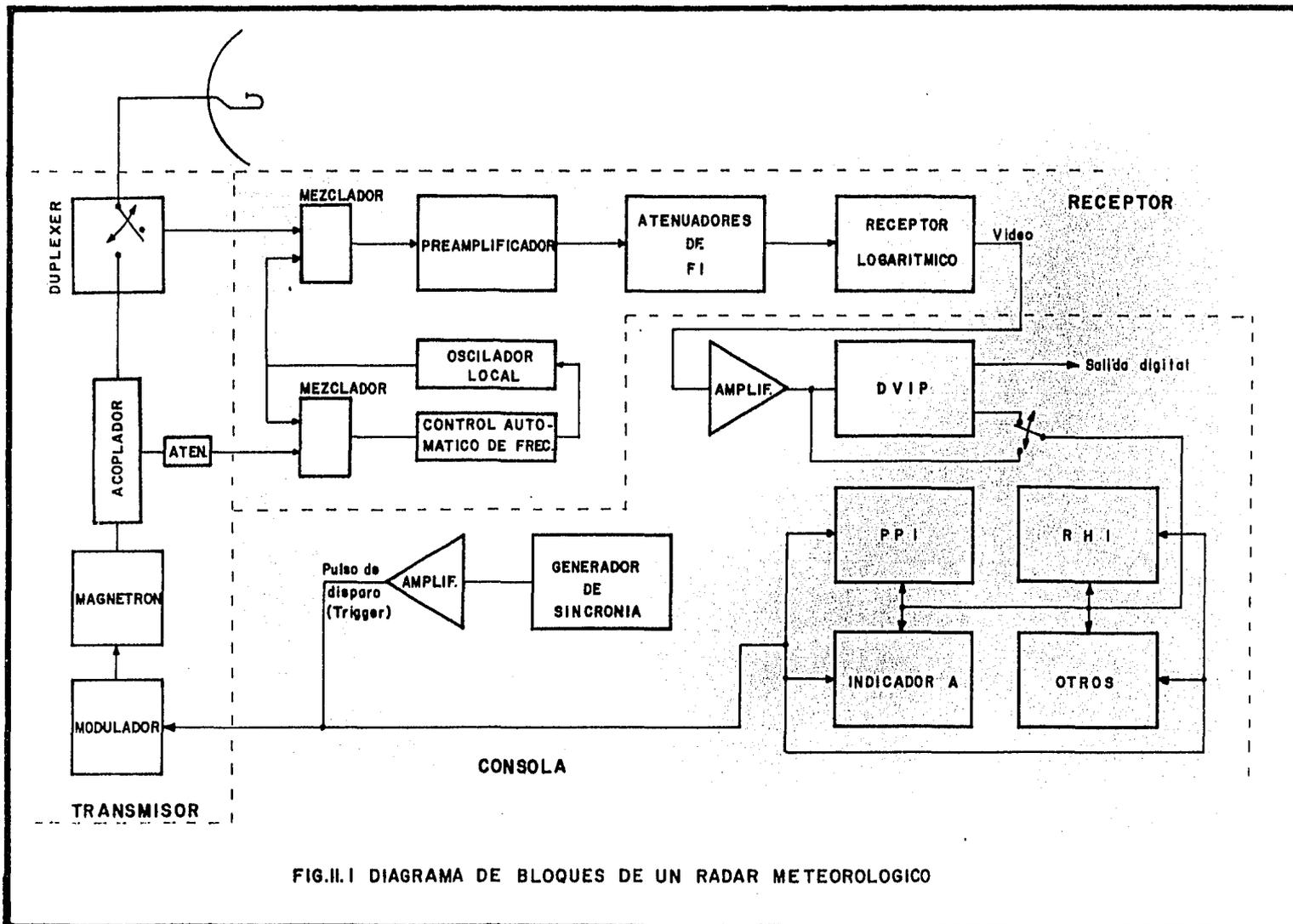


FIG.II.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN RADAR METEOROLOGICO

La señal reflejada por el blanco es conducida al receptor mediante un mezclador, este tiene amplio rango dinámico y es muy poco susceptible a sobrecargas e interferencias electrónicas.

Un segundo mezclador y el oscilador local (LO) convierten la señal de RF a una frecuencia intermedia (FI), teniendo como frecuencia central de 30 a 60 MHz y un ancho de banda del orden de 1MHz.

Después de ser amplificada, la señal de FI es convertida en señal de video en el receptor logarítmico en el cual la salida de este circuito es electrónicamente igual al logaritmo de la señal de entrada. La señal de video producida es enviada a los indicadores en donde es presentada en sincronía con los pulsos generados en los circuitos de sincronización.

2.2 INDICADORES

En cuanto a los indicadores, diversos tipos de ellos son utilizados en los sistemas de radar la mayoría de los cuales están constituidos por TRC (Tubos de Rayos Catódicos). Los TRC están formados por un cañón de electrones, un deflector magnético o electrostático y una pantalla. El haz de electrones emitidos por un cátodo caliente es enfocado sobre una pantalla cubierta con una o varias capas de material fosforescente.

El indicador más importante para aplicaciones meteorológicas es el indicador de posición en plano: PPI (Plan Position Indicator) el cual presenta en coordenadas polares (azimut, distancia) la información de los ecos detectados por la antena. En el caso de este indicador, se produce por medios electrónicos una deflexión del haz de electrones en sincronía con el movimiento de la antena; de esta manera las áreas de precipitación son mostradas como un mapa en la pantalla.

Otro tipo de indicador utilizado en radares meteorológicos es el indicador de distancia y altura: RHI (Range Height Indicator) el cual presenta en una pantalla rectangular la distancia horizontalmente y verticalmente la altura de los ecos recibidos, la pantalla está graduada en sentido vertical para medir la altura de los ecos.

Tanto el PPI como el RHI utilizan tubos de rayos catódicos de intensidad modulada los cuales permanecen oscuros en ausencia de ecos y tienen un pequeño rango de brillantez de aproximadamente 10-dB o menos por lo cual no se les puede utilizar para determinar la intensidad de los ecos en forma directa.

El indicador A es el tercer tipo de pantalla y está constituido -- también por un TRC de amplitud modulada, proporcionando una imagen rectangular con la distancia en el eje horizontal y la intensidad_ relativa del eco en el eje vertical. En el indicador A se puede - distinguir con facilidad las variaciones características de los ecos incoherentes de la precipitación con los ecos coherentes relativamente estables producidos por objetos fijos.

Se utilizan en la práctica otros tipos de pantalla constituyendo, - sin embargo, la gran mayoría los ya descritos.

El diagrama de bloques de la Figura II.1 es muy simplificado y omi te muchos detalles, unicamente se muestra un diagrama general bás_i co del radar meteorológico. Una descripción más detallada de un - sistema de radar específico se presenta en el capítulo III.

2.3 ANTENA

Otra parte importante del radar es la antena, cuya forma más ade-- cuada para los radares meteorológicos es la de un paraboloide circy lar. La antena emite la energía hacia la atmósfera y recibe la -- energía de la señal reflejada. Las primeras antenas de radar con sistian de un simple dipolo de media onda colocado en el foco del_ paraboloide. Los radares modernos utilizan generalmente un cuerno de guía de ondas el cual tiene una capacidad de emisión más concen trada en una dirección y permite un mejor control de la ilumina- - ción del paraboloide.

La antena concentra la energía en un haz angosto el cual es apunta do en la dirección deseada. Un patrón de radiación típico de una_ antena parabólica circular se muestra en la Figura II.2. Después_ del lóbulo primario el cual contiene la mayor parte de energía de_ emisión se encuentra el primer lóbulo lateral el cual típicamente_ se emite a un ángulo igual al doble de ancho del haz principal con

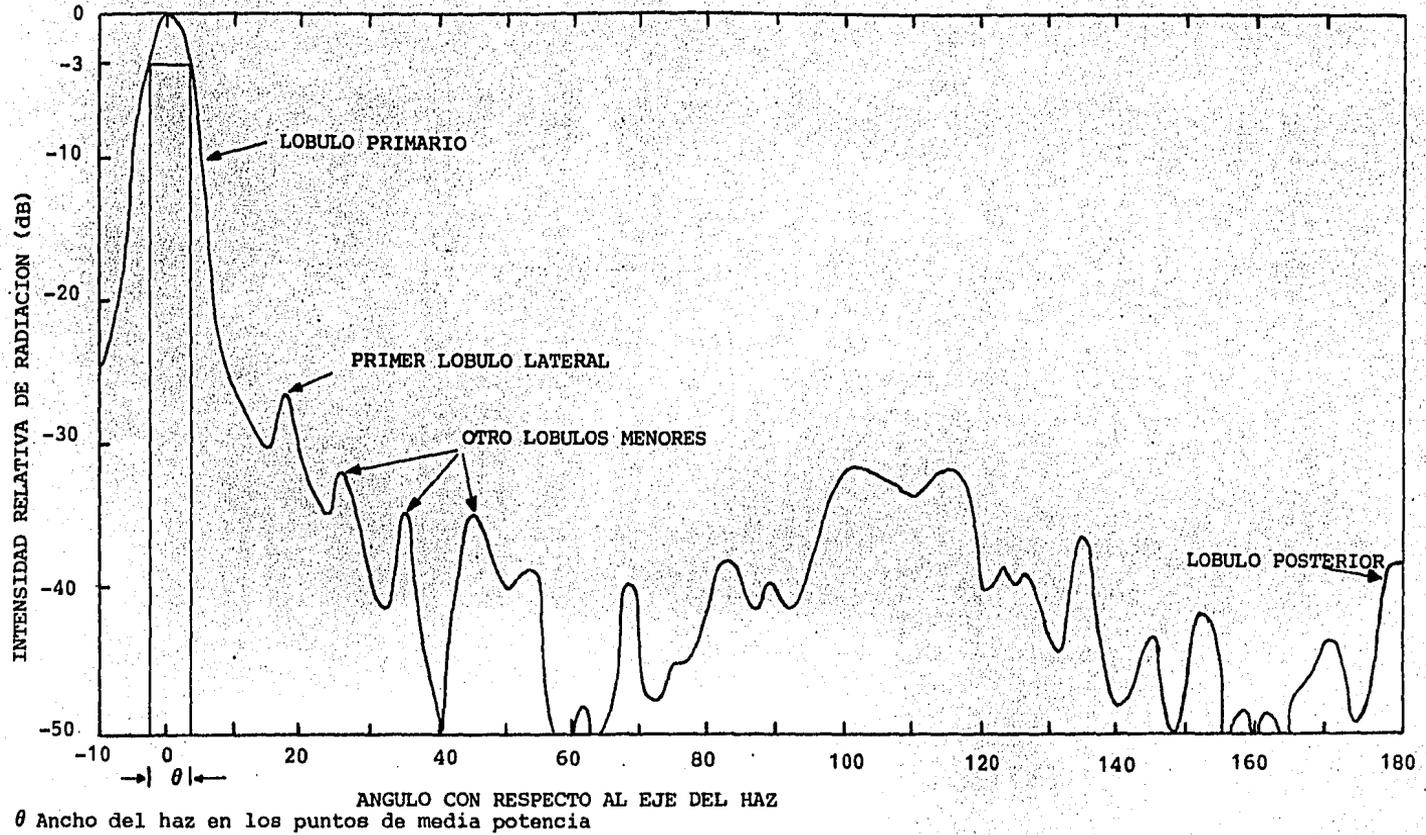


FIGURA II.2 PATRON DE RADIACION TIPICO DE UNA ANTENA PARABOLICA CIRCULAR.

respecto al eje central de emisión, siendo su energía aproximadamente 30 dB inferior con respecto a la energía máxima del lóbulo principal. Generalmente aparecen otros lóbulos laterales con niveles de energía menores al del primer lóbulo lateral.

Aunque el efecto de los lóbulos laterales puede despreciarse en la mayoría de los casos, pueden producir efectos importantes especialmente en lo relativo a mediciones cuantitativas de la intensidad -- de los ecos, por ejemplo si se mide la intensidad del eco producido por una tormenta, al mismo tiempo un lóbulo lateral produce un eco fuerte en una posición diferente a la del eco de la tormenta, la mezcla de ambos dará como resultado una intensidad mucho mayor que la de cualquiera de los ecos individuales no siendo posible diferenciarlos. Además los lóbulos laterales producen ocasionalmente picos sobre los ecos de las tormentas dando lugar a mediciones erróneas de las cimas de las nubes.

El tamaño de la antena depende en parte de la frecuencia, del ancho del haz y del lugar en donde se va a instalar y operar. Entre más baja es la frecuencia, la antena debe ser más grande físicamente. En la banda de ultra alta frecuencia (UHF) una antena puede tener un diámetro de 30 mts o más, mientras que en frecuencias más altas de microondas (banda X) las antenas de 3 ó 6 mts. se consideran grandes, suponiendo que el ancho del haz deba ser pequeño.

Ya que las antenas y sus mecanismos de movimiento con frecuencia son sometidos a condiciones de tiempo severas tales como vientos fuertes, temperaturas extremas, heladas, etc., generalmente se les instala dentro de cúpulas llamadas Radomo el cual debe ser lo suficientemente fuerte para proteger a la antena pero no debe atenuar ni distorsionar la energía emitida y recibida por ésta.

Se ha podido determinar que las cúpulas mojadas por lluvia causan alguna atenuación y distorsión en el tránsito de la energía especialmente cuando las longitudes de onda son de 3 cm o inferiores.

3. CARACTERISTICAS DE LA ENERGIA ELECTROMAGNETICA

La energía electromagnética está constituida por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre si y a la dirección de propagación de la energía. Con el objeto de especificar la orienta

ción de las ondas electromagnéticas en el espacio, se eligió por convención designar al plano que contiene el campo eléctrico como el plano de polarización de la onda. Cuando el campo eléctrico es horizontal se dice que la onda está polarizada horizontalmente; si el plano de polarización permanece fijo se dice que la polarización es lineal; en cambio si el campo eléctrico cambia de posición gradualmente en un patrón determinado se dice que la polarización es no-lineal y ésta puede ser polarización circular o polarización elíptica.

Los copos de nieve y las gotas grandes por sus características aerodinámicas tienden a caer presentando horizontalmente sus zonas de superficie máximas. Tomando en cuenta lo anterior resulta que para obtener un eco de mayor intensidad de estos objetos sería conveniente utilizar ondas polarizadas horizontalmente. Sin embargo, se ha encontrado que el efecto en cuestión es relativamente pequeño por lo cual tanto la polarización horizontal como la vertical es adecuada para la detección de zonas de precipitación.

La reflectividad de la precipitación para ondas polarizadas circularmente es inferior a la que se presenta para ondas polarizadas linealmente. Para el caso de lluvia es aproximadamente inferior a 20 dB; 15 dB para la nieve y 10 dB aproximadamente para la nieve en fusión. Esta propiedad permite que los radares que utilizan polarización circular detecten objetos tales como aviones dentro de las nubes.

4. BANDAS DE FRECUENCIA

Con el desarrollo del radar se estableció un código que fué empleado para designar las bandas de frecuencia utilizadas para los radares (S,X,L, etc), en donde se utilizaron letras por motivos de seguridad militar; la designación se ha mantenido a la fecha por tener una nomenclatura corta y se utiliza con frecuencia en la terminología de los radares meteorológicos. La Tabla II.1 lista la nomenclatura de las bandas de frecuencias de radar adoptadas por el IEEE y relaciona la banda específica asignada por la Unión de Telecomunicaciones Internacionales (ITU) para radar. Por ejemplo el rango de frecuencia nominal para la banda L es de 1000 a 20000 MHz.

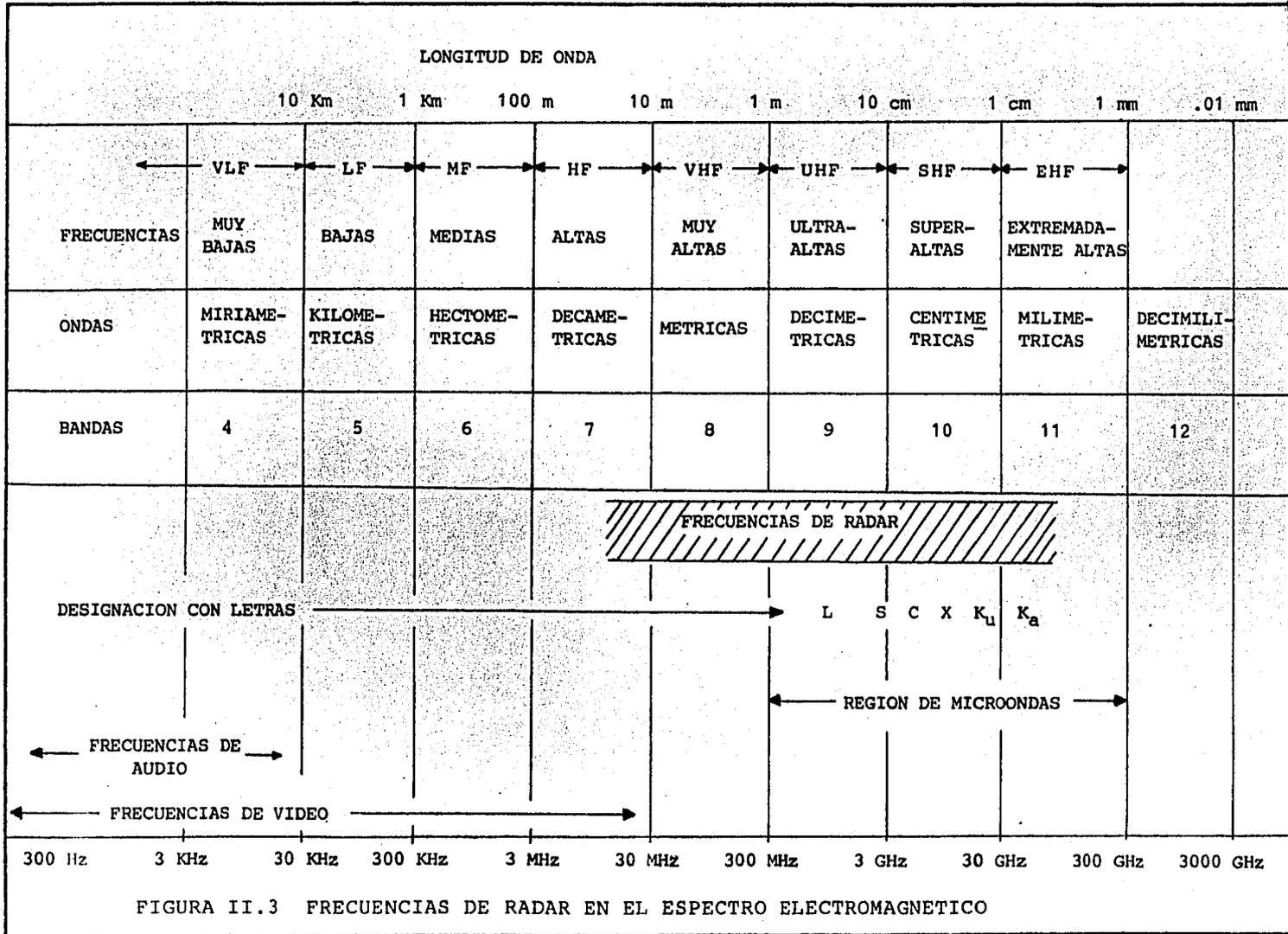
y el radar de banda L está dentro de la región de 1215 a 1400 MHz ya que es la banda asignada. La nomenclatura de la banda no es un sustituto de los límites de frecuencia numérica actual de los radares. Los límites de frecuencia numérico se usan cuando es necesario o apropiado, la designación del código es usada para una notación corta.

TABLA II.1

NOMENCLATURA DE BANDAS CON LETRAS PARA FRECUENCIAS DE RADAR

DESIGNACION DE LA BANDA	RANGO DE FREC. NOMINAL	BANDAS (DE RADAR) DE RADIO. LOCALIZACION ESPECIFICA BASADAS EN ASIGNACIONES ITU PARA DOS REGIONES.
HF	3 - 30 MHz	
VHF	30 - 300 MHz	138 - 144 MHz 216 - 225
UHF	300 - 1000 MHz	420 - 450 MHz 890 - 942
L	1000 - 2000 MHz	1215 - 1400 MHz
S	2000 - 4000 MHz	2300 - 2500 MHz 2700 - 3700
C	4000 - 8000 MHz	5250 - 5925 MHz
X	8000 - 12000 MHz	8500 - 10680 MHz
Ku	12.0 - 18 GHz	13.4 - 14.0 GHz 15.7 - 17.7
K	18 - 27 GHz	24.05 - 24.25 GHz
Ka	27 - 40 GHz	33.4 - 36.0 GHz
mm	40 - 300 GHz	

Los radares modernos operan en una porción del espectro electromagnético situado dentro de la región de microondas, su longitud de onda varía entre 136 cm y 1 cm que corresponde a un rango de frecuencia de operación de 220 MHz a 35 GHz con un ancho de más de 7 octavas. Estas frecuencias no son necesariamente los límites ya que los radares pueden operar a frecuencias fuera de este rango, como



radares de HF de ondas de tierra a 2 MHz y los radares milimétricos que operan a 94 GHz. Los radares laser operan aún a más altas frecuencias.

La mayoría de los radares meteorológicos operacionales funcionan con longitudes de onda de 10, 5 ó 3 cm aunque también se obtiene información meteorológica de radares de 20 cm y para detección de nubes se hace uso de longitudes de onda tan cortas como de 0.86 cm.

Bajo iguales condiciones atmosféricas la intensidad del eco producida por nubes o precipitación aumenta al disminuir la longitud de onda. Además, para el mismo tamaño de la antena el ancho del haz es más angosto para longitudes de onda más pequeñas lo cual implica mejor resolución. Sin embargo, a longitudes de ondas pequeñas se produce una atenuación mayor al paso del haz por las nubes o zonas de precipitación.

Por lo tanto, la selección de la longitud de onda a la cual funcionará el radar depende de la aplicación a la cual se pretenda destinarlo. Para la detección de nubes son convenientes longitudes de ondas cortas, del orden de 1 cm; para la detección de nieve o lluvia ligera o moderada, el uso de radares de 3 cm parece ser el óptimo, sin embargo, la radiación a esta longitud de onda es grandemente atenuada en zonas de lluvia fuerte por lo cual en lugares afectados con frecuencia por grandes tormentas y huracanes la utilización de radares de 5 cm o aún de 10 cm es recomendable.

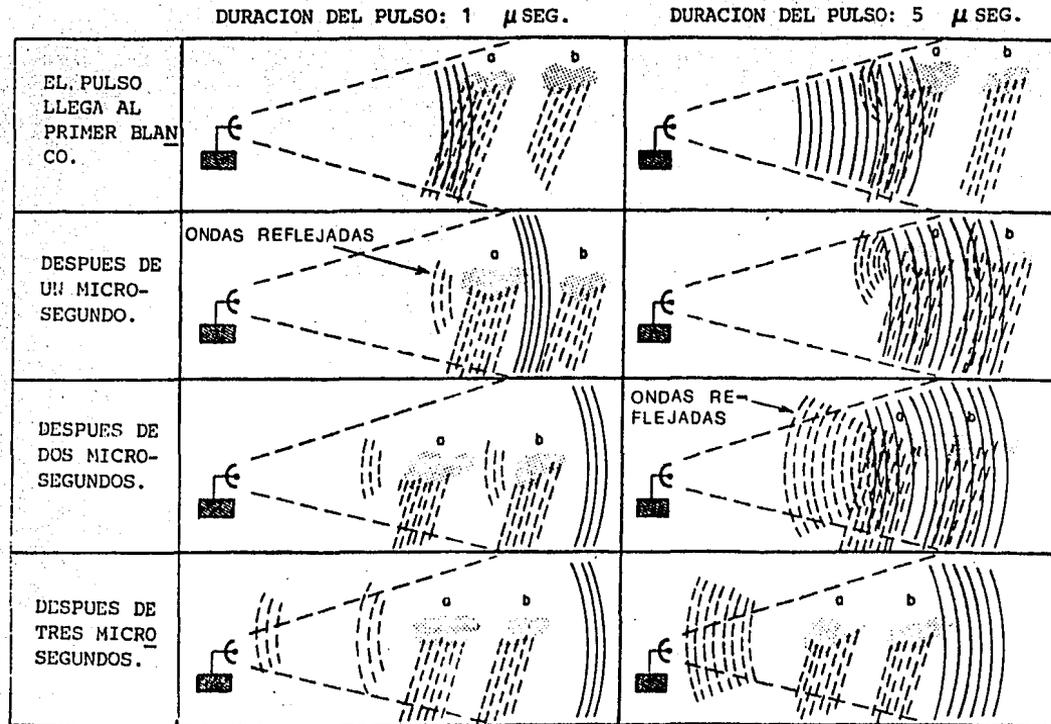
El lugar de las frecuencias de radar en el espectro electromagnético se muestra en la Figura II.3 incluyendo la nomenclatura para designar regiones en varias bandas.

5. CARACTERISTICAS DEL HAZ DEL RADAR

Es importante definir y determinar los parámetros principales que caracterizan al sistema de radar ya que son la base para cuantificar la intensidad de la precipitación.

5.1 LONGITUD DEL PULSO

La longitud del pulso del radar l en el espacio está dada por el producto de la duración del pulso T y la velocidad de la luz o sea $C \cdot T$. Por lo tanto, un pulso de un microsegundo ocupa en el



Los blancos 'a' y 'b' se encuentran suficientemente distanciados para dar ecos separados cuando la longitud del pulso es de 300 metros.

Los ecos aparecerán en la pantalla como uno solo cuando la longitud del pulso es de 1500 metros.

FIGURA II.4 EFECTO DE LA LONGITUD DEL PULSO EN LA RESOLUCION DEL RADAR.

espacio una longitud de 300 metros.

La longitud del pulso de radar limita el detalle máximo de las observaciones de posición en distancia (Figura II.4). Dos blancos situados aproximadamente en el mismo azimut aparecerán en la pantalla de radar como uno solo, siempre que la separación entre ellos sea igual o menor a la mitad de la longitud del pulso y como blancos distintos si su separación es mayor que esa distancia. Una mejor resolución se obtendrá con una longitud de pulso menor que con un pulso mas largo. Por otro lado, un pulso de mayor longitud implica que se emite mayor cantidad de energía lo cual permitiría la detección de blancos mas débiles y a mayor distancia. El uso de pulsos relativamente largos (de 5 microsegundos) los cuales contienen aproximadamente 5 veces mas energía que uno de 1 microsegundo, permitirán la detección de blancos a grandes distancias aunque la resolución es reducida considerablemente. Para algunas aplicaciones tal como detección de nubes se ha encontrado satisfactorio el uso de pulsos cortos hasta de 0.5 microsegundos.

La longitud del pulso determina el alcance mínimo es decir, determina la distancia del objeto mas cercano que será posible detectar y la distancia entre objeto y objeto para diferenciarlos. Tomando en cuenta que la energía electromagnética deberá viajar durante un tiempo T en ambos sentidos entonces:

$$R_{\min} = \frac{L}{2} = \frac{C \cdot T}{2}$$

Si el ancho del pulso es de 3 useg., la distancia mínima es:

$$R_{\min} = \frac{(3 \times 10^8) (3 \times 10^{-6})}{2} = 450 \text{ m.}$$

5.2 FRECUENCIA DE REPETICION DEL PULSO (PRF)

El PRF (Pulso Repetition Frequency) se define como el número de pulsos transmitidos por el radar en la unidad de tiempo. El intervalo de tiempo entre pulso y pulso es considerablemente mayor que la duración del pulso y limita el alcance máximo del radar.

El PRF debe ser suficientemente alto para no perder ningún detalle lejano por el movimiento en azimut del haz, pero lo suficientemente

bajo para dejar entre pulso y pulso tiempo suficiente para que viajen hasta el blanco más lejano que se pretende detectar y regresar hasta la antena antes de que se inicie el siguiente pulso.

Ya que el alcance máximo de radar es r dado por:

$$r = \frac{C \cdot t}{2}$$

en donde:

r = distancia de la antena al objeto.

t = tiempo o período entre pulso y pulso.

C = velocidad de la luz.

entonces el tiempo de ida y vuelta es:

$$t = \frac{2r}{C}$$

y el PRF es el inverso de esta relación:

$$\text{PRF} = \frac{1}{t}$$

La frecuencia para estos pulsos es diferente para cada equipo, algunos valores típicos son: 545, 400, 360, 259, 164 pps (pulsos por segundo).

Adicionalmente, el PRF y la duración del pulso T están relacionados en el diseño general del radar de manera que la potencia promedio P_m generada por el transmisor del radar es igual al producto de la potencia pico del pulso P_p , el PRF y la duración del pulso, esto es:

$$P_m = P_p \cdot \text{PRF} \cdot T$$

Ya que el ciclo de trabajo del radar es igual al producto del PRF y la duración del pulso T , la potencia promedio es igual al producto de la potencia pico y el ciclo de trabajo:

$$CT = PRF \cdot T$$

$$P_m = P_p \cdot CT$$

5.3 ANCHO DEL HAZ

El patrón de radiación de la energía emitida por el radar depende tanto de las dimensiones de la antena como de la longitud de onda. Para la detección de tormentas, el patrón de radiación típico está configurado por un lóbulo primario, el cual tiene mayor parte de energía, y por varios lóbulos laterales en donde la energía se reduce por un factor de 10^3 como mínimo; el lóbulo primario es cónico y simétrico (Figura II.5) tanto horizontal como verticalmente.

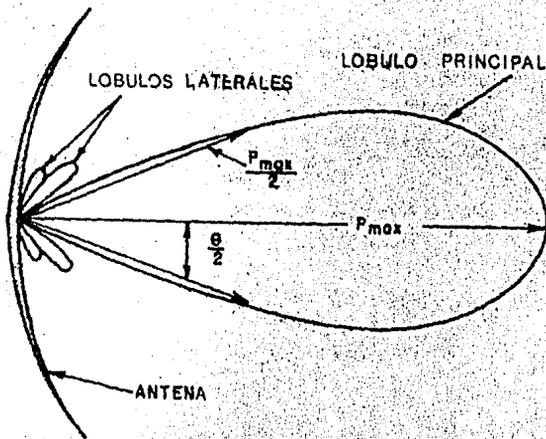


FIGURA II.5. SECCION TRANSVERSAL DEL HAZ PRODUCIDO POR UN REFLECTOR PARABOLICO.

La potencia máxima dentro del haz se emite en la dirección hacia la cual la antena se encuentra apuntando y decae gradualmente al principio en otras direcciones relativas al eje de la antena, disminuyendo drásticamente después. Los puntos del haz en donde la potencia es la mitad de la potencia máxima son denominados "puntos de media potencia" y el ancho del haz se define como la distancia angu

lar entre los puntos de media potencia del lóbulo primario; aproximadamente, del 75 al 80% de la energía emitida está contenida dentro de este volumen. La Figura II.2 muestra también dichos puntos. Una fórmula empírica que permite calcular el ancho del haz aproximadamente para un paraboloide circular es la siguiente:

$$\theta = \frac{70\lambda}{d}$$

en donde λ es la longitud de onda y 'd' es el diámetro de la antena ambos expresados en centímetros.

Para un determinado diámetro de la antena, el ancho del haz es más angosto a longitudes de onda menores, por ejemplo, en un sistema de 10 cm de longitud de onda con una antena de 4 metros de diámetro produce un haz con un ancho de 1.75° , en cambio un sistema de 5.6-cm de longitud de onda con una antena del mismo tamaño produce un haz con un ancho de 1.0° . Por lo tanto, para que un radar de 10-cm produzca un haz de 1.0° de ancho se requiere una antena de aproximadamente 7.0 metros de diámetro.

5.4 RESOLUCION DEL RADAR POR ENSANCHAMIENTO DEL HAZ

La resolución se define como la habilidad del radar para mostrar blancos discretos separadamente. Existen dos tipos de resolución:

1. La resolución en distancia que consiste en la habilidad para distinguir entre dos blancos en el mismo azimut pero diferentes distancias.
2. La resolución angular que consiste en la habilidad del radar para distinguir entre dos blancos a la misma distancia pero diferente azimut.

La resolución en distancia de un radar es la mitad de la longitud del pulso como se definió en el punto 5.1 y la resolución angular es función del tamaño y forma del haz del radar. La resolución angular varía inversamente con la distancia de los blancos al radar.

(Figura II.6).

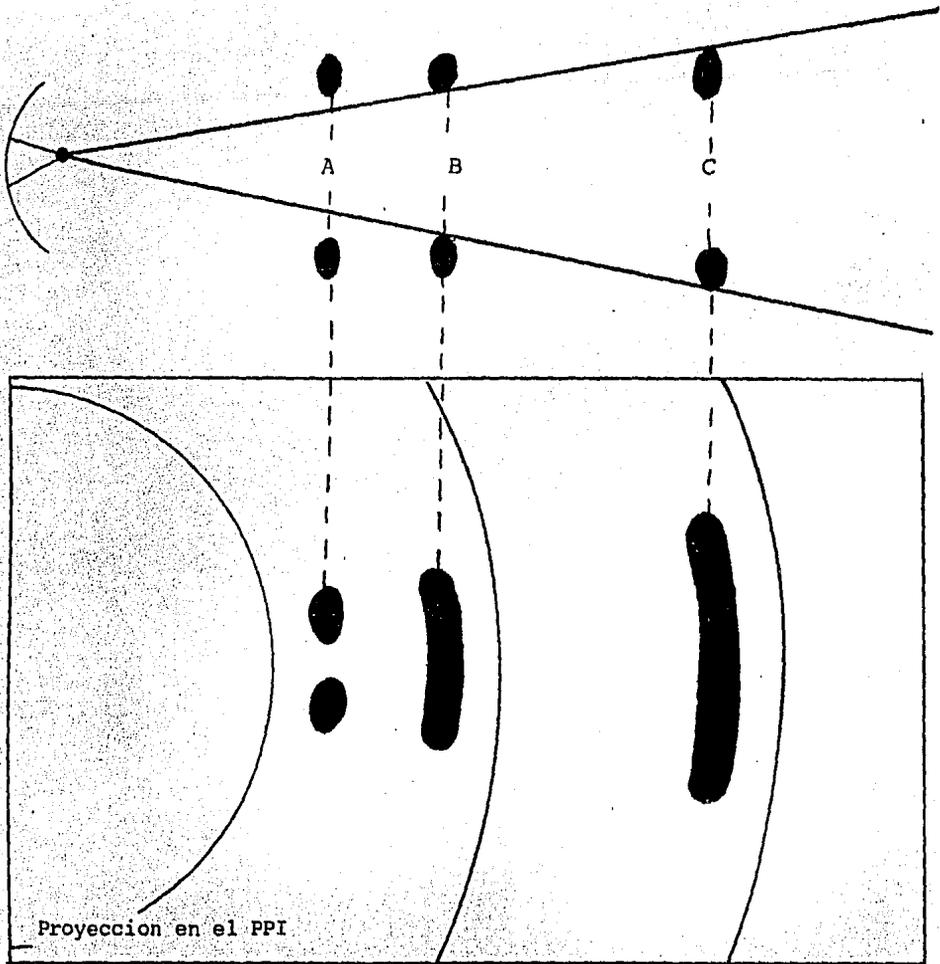


FIGURA II.6 RESOLUCION ANGULAR Y ENSANCHAMIENTO DEL HAZ

La Figura II.6 se ha exagerado para mostrar mas claramente la resolución angular y ensanchamiento del haz. Los blancos a la distancia A aparecerán en la pantalla separados solamente si el haz estuviera girando; ninguno aparecería si el haz estuviera fijo. Los blancos a la distancia B aparecerán en la pantalla como un eco ya que dichos blancos no estan separados por el ancho del haz. Los blancos a la distancia C aparecerán como un eco mas grande ya que el ancho del haz se ha incrementado.

Cualquier blanco, sin importar cuanto sea llenado por el haz, que refleje a la antena una señal detectable, al ser presentado en los indicadores será al menos tan grande como el ancho del haz en una dimensión y tan largo como la longitud del pulso en la otra dimensión. Ya que el ancho del haz aumenta conforme aumenta la distancia, los blancos a grandes distancias deben estar separados entre si por distancias más grandes, para que aparezcan como blancos separados en las pantallas.

Una consecuencia importante es el aumento de la distorsión por ensanchamiento del haz la cual aparece en las pantallas como un alargamiento a ángulos rectos con respecto al centro del haz, conforme la distancia se incrementa desde el radar.

La Figura II.7 muestra la trayectoria y ensanchamiento teórico del haz del radar.

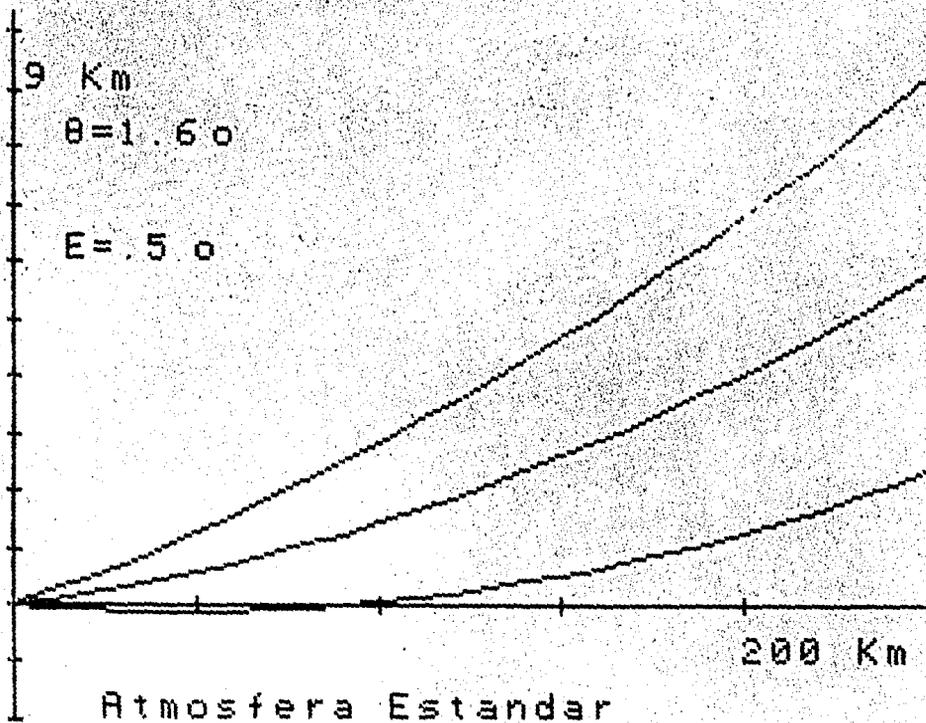


Figura II.7 ENSANCHAMIENTO TEORICO DEL HAZ DEL RADAR

6. DETECCION DE OBJETOS Y PROPAGACION DEL HAZ DEL RADAR

El radar detecta la presencia de aquellos objetos que regresan un cierto nivel mínimo de la energía transmitida por el sistema de radar. El término genérico que se aplica a los objetos detectados por un radar es el de "BLANCO", siendo estos los que regresan al radar una cantidad detectable de energía que puede ser observada en las diferentes pantallas indicadoras como una señal o "ECO", -- distinguiéndose sin ambigüedad del ruido que siempre se encuentra en el receptor.

En cuanto a las aplicaciones meteorológicas del radar se refiere, los "blancos" de interés son aquellos constituidos principalmente por gotas de lluvia, granizo, cristales de hielo, copos de nieve, partículas de hielo de diversas combinaciones tal y como se encuentran en la precipitación natural o dentro de las nubes. Sin embargo, además de estas partículas propias de fenómenos meteorológicos significativos también se detectan los llamados ecos indeseables que son objetos sólidos tales como la superficie terrestre, edificios, árboles, la superficie de lagos y océanos, parvadas, insectos y posiblemente regiones invisibles de la atmósfera en donde existen gradientes muy pronunciados de temperatura y humedad los cuales pueden producir errores en las observaciones debido al empalme con los ecos producidos por los fenómenos de interés.

Los blancos de interés meteorológico que aparecen con mayor frecuencia en las pantallas de radar son los producidos por la precipitación, es decir, el radar detecta principalmente partículas de precipitación de muy variados tamaños en tal forma que las partículas mayores son exageradas en extremo mientras que las de menor tamaño son prácticamente despreciables; por ejemplo, si una gota "A" tiene un diámetro diez veces mayor que la de una gota "B", el eco que regresa al radar de la gota "A" es un millón de veces más intenso que el de la "B", estando ambos en las mismas condiciones.

En algunos casos esto resulta ser una característica benéfica ya que los fenómenos meteorológicos más peligrosos en cuanto a turbulencia, intensidad y rachas de vientos y presencia de granizo, están asociados a concentraciones de partículas de gran tamaño y por lo tanto a ecos intensos.

6.1 BLANCOS DE GRANDES SUPERFICIES

Si las ondas de energía del radar alcanzan un objeto tal como un edificio o una aeronave, éstas no penetran sino que son reflejadas, regresando la mayor parte de la energía hacia la antena. En este caso, el radar mostrará en la pantalla un eco, correspondiendo su ubicación a la del objeto reflector pero sin dar información adicional acerca de la extensión y la forma del objeto, ya que la reflexión proviene del borde más cercano únicamente. Si el objeto abarca un ángulo más pequeño que el ancho del haz, el eco aparecerá en la pantalla del PPI como un arco, cuyas dimensiones estarán determinadas principalmente por el ancho del haz y la longitud del pulso del radar. Si el objeto es significativamente más grande -- que el ancho del haz la forma de su borde más próximo al radar aparecerá en la pantalla. De la misma forma, las características de un terreno, especialmente aquellas próximas al radar, son a menudo observables pero con frecuencia distorsionadas en forma y tamaño, + generalmente lados de una montaña que están hacia el radar son detectados y las intensidades pueden variar en la pantalla debido a las diferentes pendientes y a la superficie del terreno. Los ecos de las líneas de las costas pueden deberse a hileras de árboles y a zonas altas del terreno y no necesariamente muestran la forma -- real de la costa.

6.2 ECOS FIJOS O DE TIERRA

Las características terrestres semejantes a colinas, construcciones, árboles y líneas de potencia, localizados muy cerca del radar pueden producir ecos permanentes o semipermanentes en la pantalla, dependiendo de su distancia, altura relativa y condiciones meteorológicas prevalecientes. Durante períodos de entubamiento y superrefracción (condiciones que se explican posteriormente) el eco de -- tierra es frecuentemente más grande que bajo condiciones normales. Cada radar presenta ecos de tierra característicos alrededor del -- centro de la pantalla PPI.

6.3 BLANCOS METEOROLOGICOS

Las gotas de lluvia, gotas de nube y otros hidrometeoros retornan__

energía electromagnética a la antena, y aunque muy poca es retornada por cada partícula, una concentración de estos pequeños blancos producen un eco detectable, siendo éstos generalmente los blancos de interés o "blancos meteorológicos". Aunque es conveniente considerar que la energía retornada al radar desde el blanco ha sido reflejada, esto no es totalmente exacto, sobre todo en el caso de blancos pequeños cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de la energía transmitida por el radar. En estos casos la energía incidente en las pequeñas partículas causa una oscilación en su carga eléctrica y esto produce una radiación de energía por la partícula en si, de la misma longitud de onda que la radiación incidente. En el campo de radar meteorológico, este fenómeno junto con la verdadera reflexión, es generalmente conocido como "dispersión". Por otro lado, el término "reflectividad" es usado para describir la capacidad de los objetos para "reflejar" la energía de radar que incide sobre ellos.

6.4 NUBES

Los radares meteorológicos de longitudes de onda de 10 y 5 cm normalmente no detectan gotas de nubes, sino zonas de precipitación. Hay excepciones posibles especialmente a distancias cercanas al radar debido a que la energía retornada alcanza a ser detectada. No obstante, muchos blancos identificados como nubes probablemente consisten de gotas de lluvia que se evaporan antes de llegar al suelo o están suspendidas por corrientes ascendentes de aire.

Los radares con longitudes de onda más corta son mejores para detectar gotas de nubes ya que la potencia recibida es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la 4a. potencia. Por esta razón un radar de 3 cm de longitud de onda y de alta potencia puede detectar nubes con mayor facilidad que uno de 10 ó 5 cm.

6.5 LLUVIA

En la práctica se considera que los radares meteorológicos de 5 ó 10 cm de longitud de onda detectan todas las gotas de agua de tamaño adecuado para precipitar, tomando en cuenta las limitaciones

de distancia y potencia. Sin embargo, como una consecuencia de -- que la energía reflejada depende de la sexta potencia del diámetro de las gotas, las gotas grandes tendrán una reflectividad mayor -- que una gran concentración de pequeñas gotas. Esto ha llegado a -- ser una circunstancia afortunada para las estimaciones de la inten-- sidad de lluvia a través de las mediciones de la potencia de la se-- ñal recibida en el radar, porque se ha determinado que existe una -- relación entre el tamaño de las gotas y la intensidad de lluvia. Esto hace al radar una herramienta muy útil para aplicaciones hi-- drológicas y para emitir avisos locales sobre posibles inundacio-- nes.

6.6 NIEVE Y HIELO

Ya que la dispersión producida por un cristal de hielo es aproxima-- damente igual a la quinta parte de la dispersión producida por una -- esfera de agua de la misma masa, los ecos de nieve son más débiles que los ecos de lluvia, cuando el contenido de agua es equivalente. Sin embargo, el hielo cubierto de agua, como se encuentra cuando -- se está derritiendo, tiene un coeficiente de dispersión cercano al de una gota de agua del mismo diámetro y ya que este diámetro es -- mayor que el de una gota pura de la misma masa, la reflectividad -- del hielo cubierto de agua puede ser muy alta. Esto, junto con el gran tamaño del granizo, se piensa que es la causa de la extremada -- mente alta reflectividad asociada con el granizo que contribuye a -- la presencia de la "banda brillante" algunas veces vista en siste-- mas de precipitación estables (Figura II.8). El nivel de congela-- ción o más exactamente el nivel de fusión, se observa con frecuen-- cia en el radar ya que al comenzar a derretirse la nieve se le for-- ma una capa de agua incrementando su coeficiente de dispersión y produciendo por lo tanto un eco más intenso. Cuando la nieve se -- ha derretido completamente, las gotas de agua resultantes serán pe-- queñas y tendrán mayor velocidad al descender resultando además -- una menor concentración de pequeñas gotas y consecuentemente un e-- co débil a más baja altitud. La banda brillante está asociada ge-- neralmente con características meteorológicas de escala sinóptica -- (De 2000 a 10,000 Km) y es relativamente frecuente su aparición en

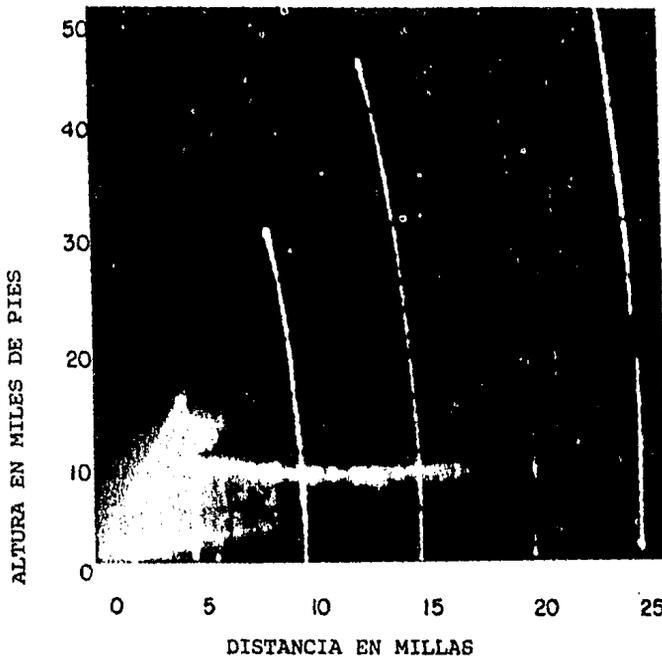


FIGURA II.8 ILUSTRACION DE LA "BANDA BRILLANTE" A 8000 ft DE ALTURA EN EL INDICADOR RHI.

en los meses de invierno. Algunas veces puede observarse durante la etapa de disipación de una gran tormenta convectiva.

6.7 PROPAGACION ANOMALA

La aparición extraordinaria de ecos de suelo se denomina comunmente "PA" (Propagación Anómala) y aunque es facilmente identificable en el radar, puede confundirse en algunas ocasiones con ecos de precipitación si se observa unicamente en el PPI. La "PA" puede aparecer en las pantallas al mismo tiempo que la precipitación pudiendo mezclarse ambos ecos lo cual ocasiona pérdidas de tiempo en la elaboración del reporte de radar por ser necesario separar ambos tipos de ecos. Existen tres tipos de propagación anómala: Superrefracción, Subrefracción y Entubamiento.

6.8 SUPERREFRACCION, SUBREFRACCION Y ENTUBAMIENTO

La velocidad de las ondas de radio en la atmósfera varía dependien

do de la densidad del aire, esto provoca que el haz no sea recto, sino curvado como se explicará en el párrafo 6.11.

Cuando el haz tiene una curvatura mayor que la estandar y permanece más cerca del suelo de lo normal, existe "Superrefracción. Si el haz esta más recto que el estandar existe "Subrefracción".

El entubamiento es una forma intensa de superrefracción que ocurre cuando el haz es atrapado bajo una inversión atmosférica. Esto es frecuente durante las horas de la mañana cuando la superficie terrestre se ha enfriado por la emisión de radiación y hay aumento de la temperatura del aire y decremento de humedad con la altura en la parte baja de la atmósfera. Puede ocurrir entubamiento en todas las direcciones del radar o dentro de ciertos límites angulares. También el flujo de aire frío asociado con tormentas convectivas algunas veces causa entubamiento. (Figura II.9).

6.9 LINEAS FINAS Y ANGELES

Las ondas de radio-frecuencias pueden ser reflejadas por discontinuidades de capas de la atmósfera en las cuales el gradiente del índice de refracción es muy pronunciado, regresando a la antena ya sea directamente o después de chocar con el suelo u otros objetos. En este caso pueden aparecer en las pantallas ecos que no sean de precipitación ni de tierra. Cuando la discontinuidad de la densidad del aire es el frente de avance del viento producido por una tormenta convectiva, el eco es denominado "Línea Fina" y debe incluirse como tal en el reporte de radar. Sin embargo, muchas veces los ecos producidos por discontinuidad no adoptan la forma de líneas y resultan difíciles de caracterizar clasificándose entonces dentro del amplio grado de ecos denominados "angeles" término utilizado para describir ecos de origen desconocido. Estos angeles generalmente aparecen como ecos débiles y amorfos y con una estructura en cambio continuo aunque en algunas ocasiones presentan patrones identificables. Dentro de este término se incluyen también los ecos producidos por pájaros e insectos.

6.10 CONFETI

El confeti es formado con muchos trozos de papel metálico lanzados en la atmósfera para crear un blanco "artificial" o interferir el radar. Los papeles son generalmente cortados con una longitud - igual a la mitad de la longitud de onda del radar. La forma y tamaño del eco producido por el confeti depende de la altitud a la que son lanzados, de la trayectoria del avión y de los vientos en la atmósfera por debajo de esta altitud. El eco aparece primero como una banda delgada y después se dispersa al caer y disgregarse el confeti con el viento. Frecuentemente es liberado en varias -- bandas paralelas y, aunque puede ser confundido con un eco meteorológico, puede notarse una diferencia entre los dos tipos de eco -- cuando se observa en el indicador "A", además, generalmente puede observarse la caída lenta del confeti.

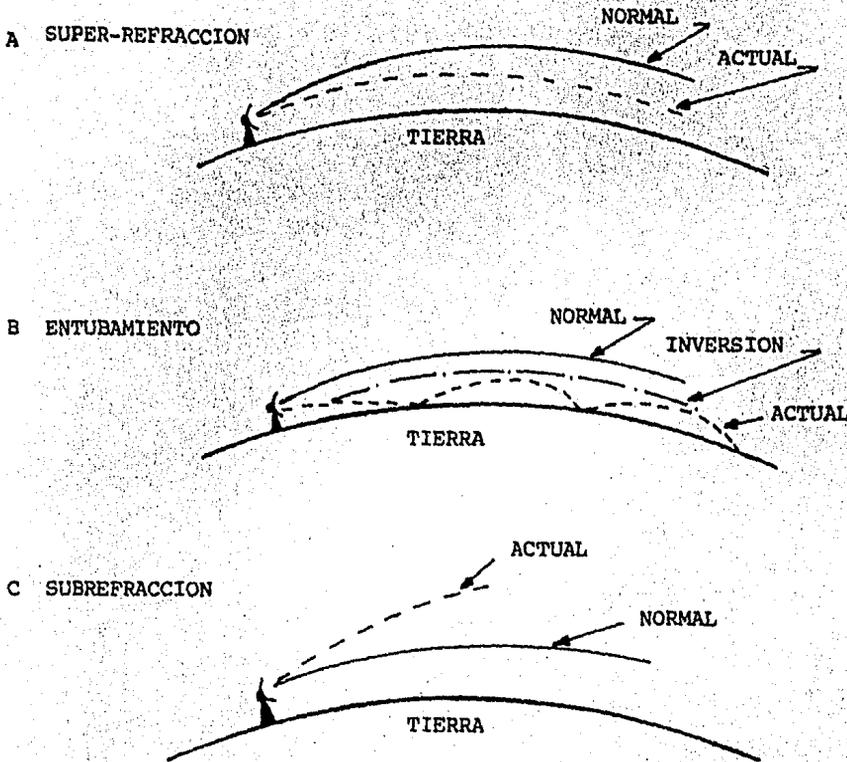


FIGURA II.9 TRES TIPOS DE PROPAGACION ANOMALA EN EL RADAR.

6.11 PROPAGACION DEL HAZ EN LA ATMOSFERA

La atmósfera es una capa gaseosa que envuelve a la tierra y está compuesta en general de gases secos y vapor de agua. Es una mezcla de aproximadamente el 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de otros gases y de vapor de agua los cuales varían en cantidad del 0 al 5% o más por unidad de volumen.

Considerando que el estado de la atmósfera alrededor de la superficie terrestre sea promediado por un período de tiempo grande, se ha encontrado que la temperatura, presión y contenido de vapor de agua disminuye conforme aumenta la altura sobre la superficie. Se ha notado que a una cierta altura la disminución de temperatura es cero, es decir la temperatura permanece esencialmente constante a grandes alturas. La altura a la cual la temperatura llega a ser constante se le llama "Tropopausa". La región isotérmica arriba de la tropopausa es llamada "Estratósfera". La región en la cual se observa una disminución de temperatura con la altura sobre la superficie terrestre, abajo de la tropopausa se le nombra "Tropósfera".

La atmósfera estándar puede ser definida como una atmósfera hipotética en la cual las propiedades son arbitrariamente escogidas para fijar ciertas condiciones promediadas.

Las ondas de radio y las ondas de luz viajan en línea recta en cualquier medio homogéneo e isotrópico, con una velocidad $v = c/n$, -- donde C es la velocidad de la luz en el vacío ($\approx 3 \times 10^8$ m/seg) y n es el índice de refracción del medio. Si el índice de refracción cambia, la velocidad así como la dirección de las ondas también -- cambian. Mientras el índice de refracción del aire es considerado como la unidad, su valor real es ligeramente mayor y varía con el estado de la atmósfera. Para ondas de radio, la fórmula empírica para el índice de refracción de la atmósfera está dado por:

$$(n-1)^6 = \frac{79p}{T} - \frac{11e}{T} + \frac{3.8 \times 10^5 e}{T^2} \quad (2.1)$$

donde:

- n - Índice de refracción de la atmósfera.
- p - Presión barométrica en milibares (1mmHg = 1.333 mb).
- T - Temperatura en grados Kelvin (273 + °C).
- e - Presión del vapor de agua en milibares.

La ecuación muestra que el índice de refracción depende de la presión, temperatura y contenido de vapor de agua en la atmósfera. - Para frecuencias altas, en la región de ondas de la luz visible, - la fórmula empírica (2.1) se puede aproximar a:

$$(n-1)^6 = \frac{79p}{T} \quad (2.2)$$

dependiendo solamente de la presión y la temperatura.

Debido a las variaciones del índice de refracción en la atmósfera, la trayectoria de una onda electromagnética al propagarse en el ai re no es recta sino curva como se muestra en la Figura II.10 y en forma cóncava hacia abajo, nombrándosele curvamiento positivo.

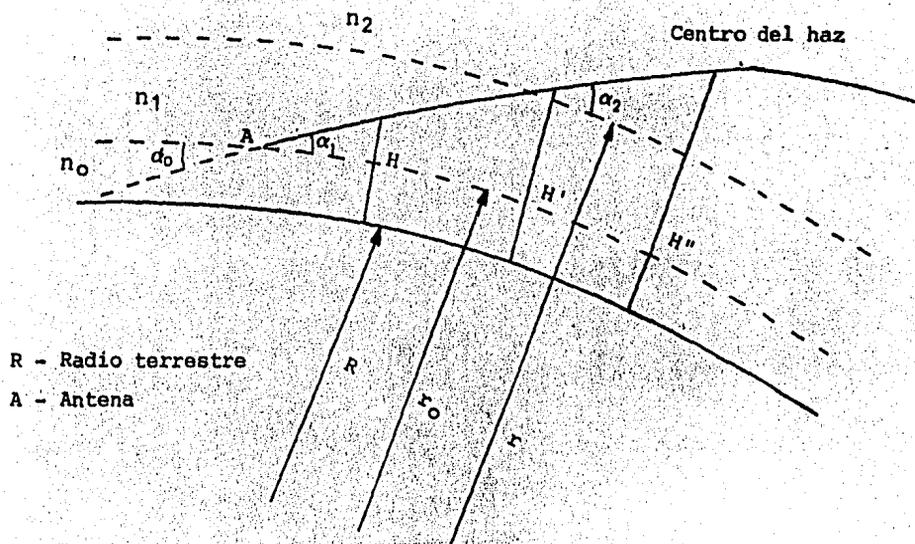


FIGURA II.10 TRAYECTORIA DEL HAZ EN LA ATMOSFERA.

El cambio de dirección esta relacionado con el índice de refracción de acuerdo con la ley de Snell dada por:

$$nr \cos \alpha = n_0 r_0 \cos \alpha_0 \quad (2.3)$$

donde:

n, n_0 - Índice de refracción del medio

r, r_0 - Radio de las capas limites.

α, α_0 - Angulo entre el rayo y las capas consecutivas.

Se puede calcular un radio terrestre teórico para el cual la trayectoria del haz en la atmósfera sería recta. Para la atmósfera estándar se ha obtenido que con un radio terrestre hipotético $R_c = 4/3R$ (R = radio medio de la tierra), la distancia H (Fig. II.11) del centro del haz a la superficie terrestre es la misma que si se calcula utilizando los valores reales del radio terrestre y de la trayectoria curva del haz.

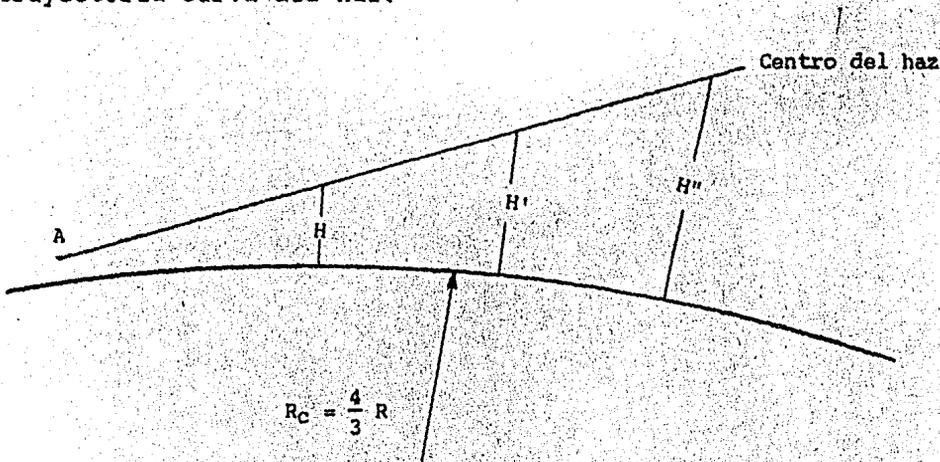


FIGURA II.11 PROYECCION DEL HAZ CON EL RADIO TERRESTRE CORREGIDO.

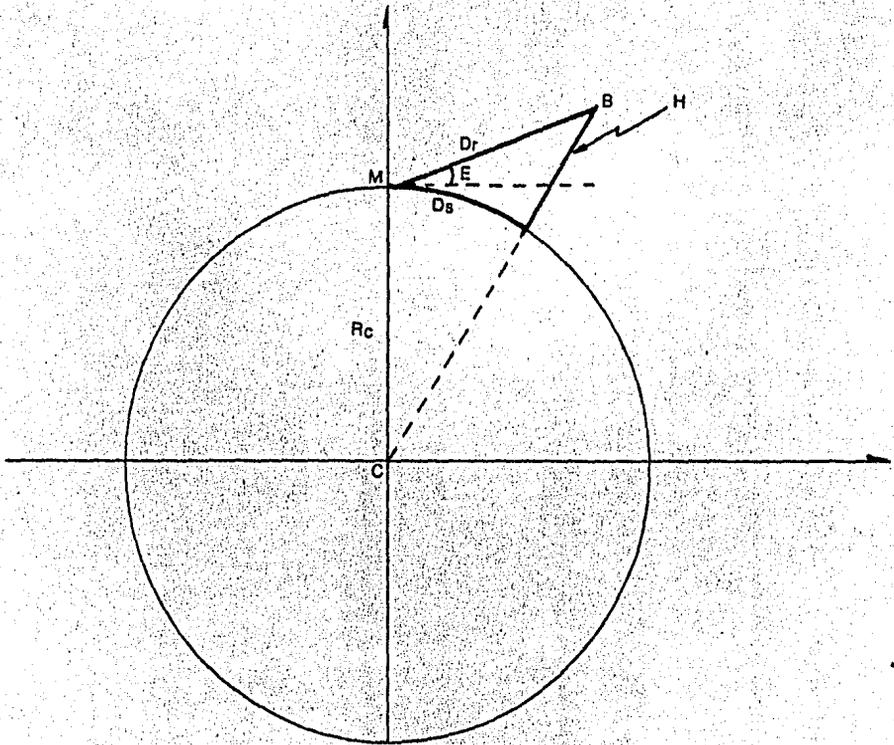
La altura H se determina teóricamente mediante la ecuación siguiente:

$$H = D_r \text{ Sen } E + \frac{D_r^2 \text{ Cos }^2 E}{2 R_c} + H_0 \quad (2.4)$$

donde:

- H - Altura del centro del haz sobre el nivel medio del mar.
- D_r - Distancia entre el blanco y la antena del radar.
- E - Angulo de elevación de la antena.
- R_c - Radio corregido de la tierra.
- H_o - Altura de la antena sobre el nivel medio del mar.

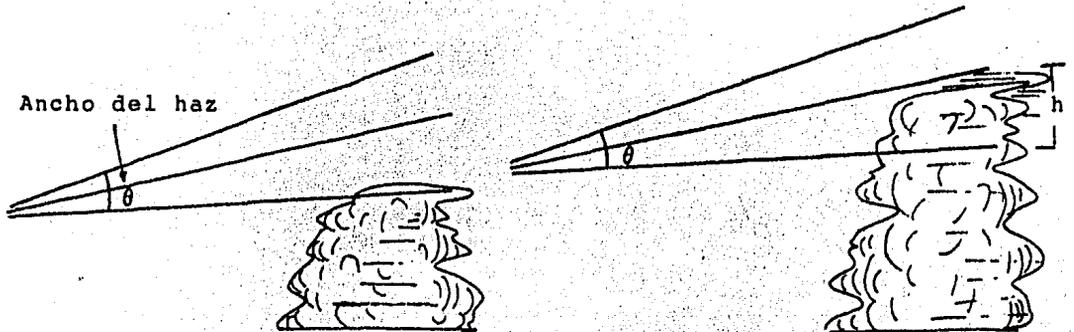
La relación anterior se puede obtener mediante la proyección mostrada en la Figura II.12.



- M - Posición del radar.
- B - Blanco del radar.
- C - Centro relativo de la tierra
- D_s - Distancia sobre la superficie terrestre.

FIGURA II.12 PROYECCION DE ALTURA Y DISTANCIA DE UN BLANCO CON RESPECTO AL RADAR.

Como se mencionó en el párrafo 5.4, cuando el ancho del haz intercepta solo una parte del blanco (Figura II.13) éste será presentado en los indicadores (específicamente en el RHI) como si estuviera situado en el centro del haz. Considerando el ensanchamiento que sufre el haz del radar al aumentar la distancia, los blancos serán presentados en las pantallas con un grado de distorsión que depende de la distancia y del ancho del haz. En el caso del RHI -



a) Posición del eco real

b) Posición del eco detectada por el radar con una distancia 'h' adicional

FIGURA II.13 INTERCEPCION DEL HAZ CON UN ECO.

esta distorsión produce mediciones erróneas de la altura de los ecos en una cantidad igual a:

$$h = D_R \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.5)$$

La altura real del eco es determinada mediante la siguiente relación:

$$H_v = H_{cp} - h \quad (2.6)$$

donde:

H_v - Altura verdadera del eco.

H_{cp} - Altura corregida por curvatura y propagación del haz dada por (2.4).

h - Altura máxima de error en el RHI dada por (2.5).

Para efectos prácticos, se han calculado tablas de un factor de corrección 'C' para varias distancias, de tal forma que aplicado a

las lecturas del RHI da la altura verdadera, esto es:

$$C = H_V - H_{RHI}$$

y la altura real viene dada por:

$$H_V = H_{RHI} - C$$

CAPITULO III

DESCRIPCION FISICA DEL SISTEMA DE RADAR METEOROLOGICO BANDA C TIPO

WSR-74C

1. DESCRIPCION GENERAL

El sistema de radar WSR-74C ha sido diseñado para proporcionar datos meteorológicos mediante la presentación de las formaciones de nubes en diversos indicadores requiriéndose de equipo auxiliar para el análisis de los datos. El alcance del radar esta limitado a 450 km, la velocidad de azimut de la antena esta limitada a 5 -- rpm ó 30° por segundo y la velocidad de elevación a 15° por segundo con un movimiento de la antena de -2° a 60° con respecto a la horizontal.

La operación del sistema de radar es completamente manual. Los datos obtenidos de las pantallas indicadoras deben ser analizados manualmente utilizando los controles e indicadores del radar.

Las unidades principales que componen al sistema son las siguientes:

Unidad 1: Consola de operación

Unidad 2: Transmisor-Receptor

Unidad 3: Antena-Pedestal

Unidad 4: Servo

Unidad 5: Presurización.

La Figura III.1 muestra el diagrama de bloques de las unidades principales.

2. CONSOLA DE OPERACION (UNIDAD 1)

La consola de operación es la unidad de control del funcionamiento y de presentación de datos del sistema de radar, los cinco conjuntos principales que componen esta unidad son los siguientes:

Indicador A

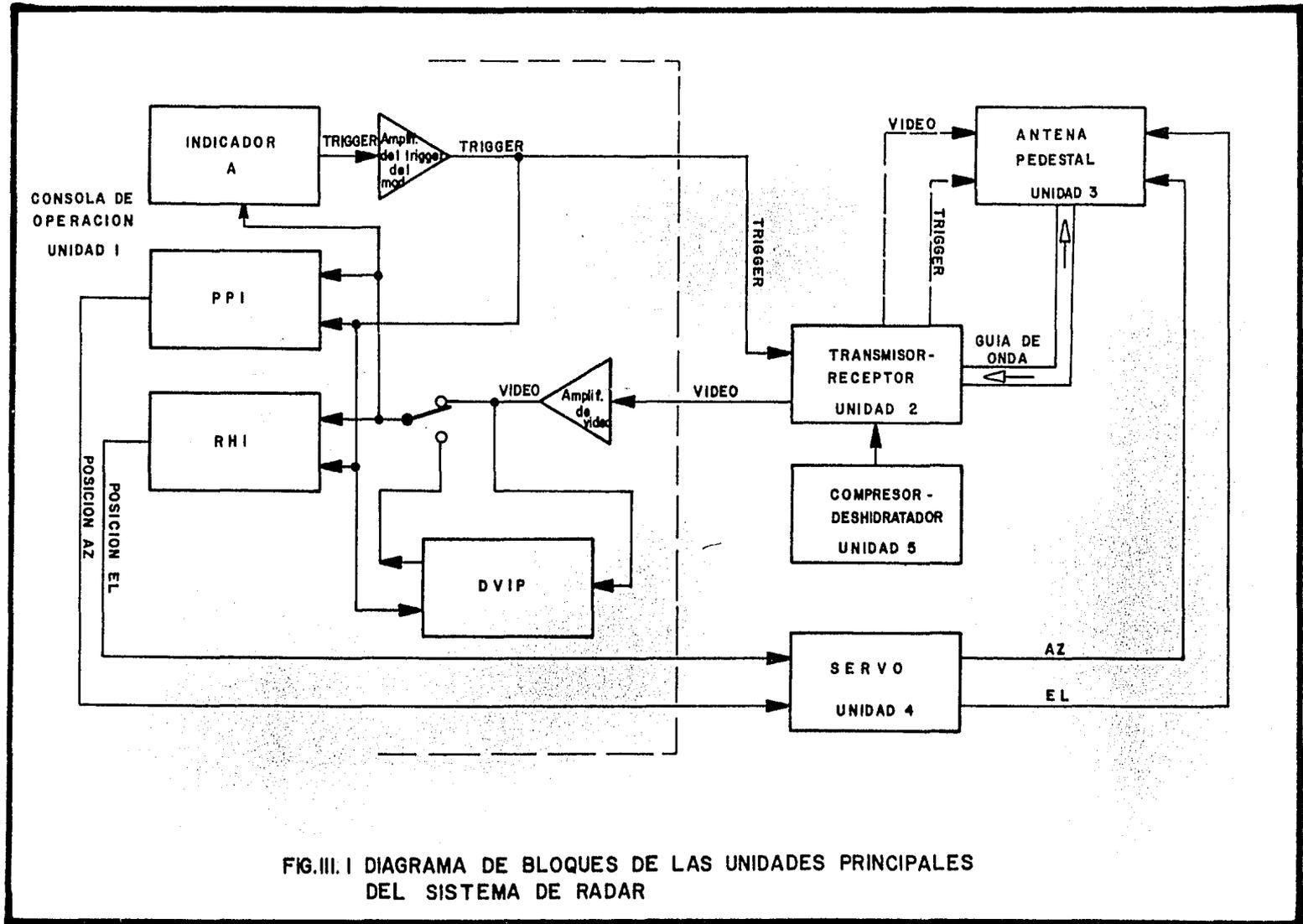
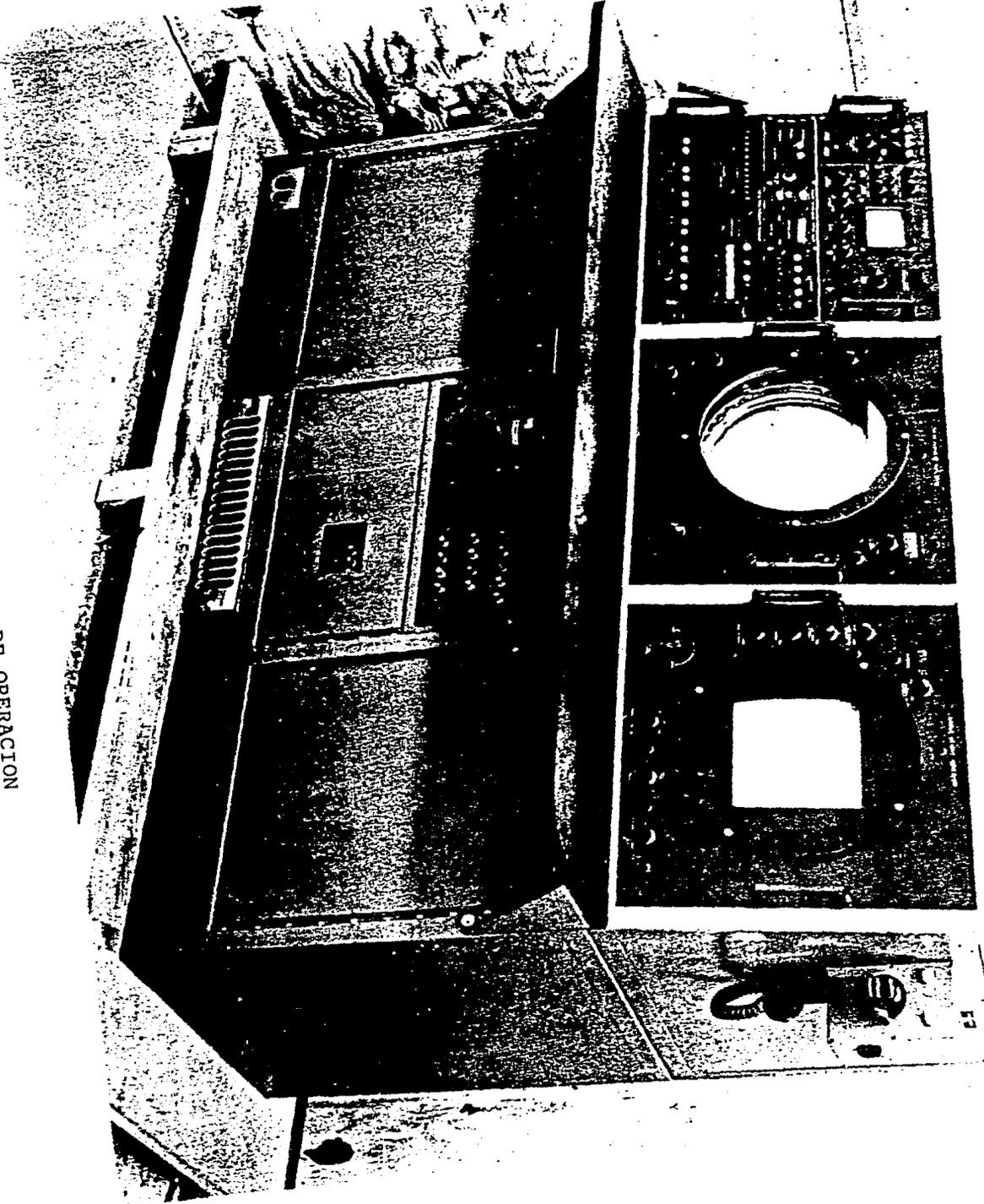


FIG.III.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS UNIDADES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE RADAR

FIGURA III.2 PRESENTACION DE LA CONSOLA DE OPERACION



Indicador de Posición en Plano: PPI
Indicador de Altura y Distancia: RHI
Procesador e Integrador Digital de Video: DVIP
Amplificadores-Distribuidores

La consola también contiene las fuentes de alimentación, transformadores, indicadores para el monitoreo de potencia y amplificadores - de distribución necesarios para operar el sistema de radar.

La Figura III.2 muestra una presentación de la consola de operación. Las especificaciones técnicas de los indicadores se dan en el Apéndice C.

2.1 INDICADOR A

El Indicador A presenta la información de distancia e intensidad relativa de ecos (video) en un TRC de 5". Contiene la unidad generadora de las marcas de distancia, del pulso de disparo (trigger) y del estrobo (cursor de distancia). El alcance de la posición del estrobo en las pantallas se presenta numericamente mediante cuatro dígitos, de 0 a 450 Km. La Figura III.3 muestra éste indicador y - la Tabla III.1 lista sus controles.

2.1.1 DESCRIPCION DEL INDICADOR A

La Figura III.4 muestra el diagrama de bloques de éste indicador y su funcionamiento se describe en base a los bloques de dicha figura.

SINCRONIZADORES

Los sincronizadores (No. 1 a No. 4) generan los pulsos de tiempo, - los de disparo y la posición y lectura de distancia del estrobo fijada mediante el control R8 (Figura III.4). Se generan dos pulsos de disparo (trigger):

- 1). Un pretrigger ajustable, usado para excitar el modulador del -- transmisor el cual compensa el retraso que existe entre el trigger y la señal de video proveniente del transmisor.
- 2). El trigger para las pantallas.

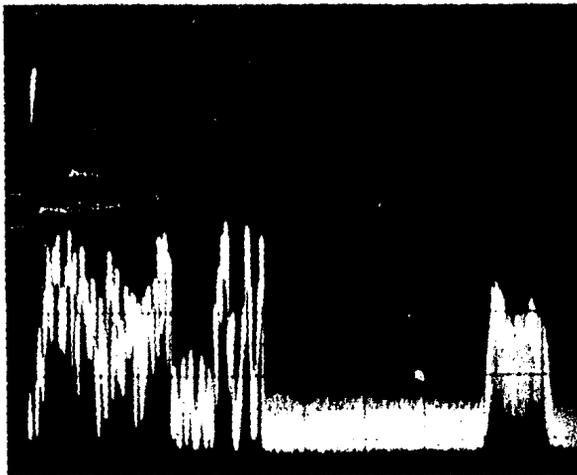
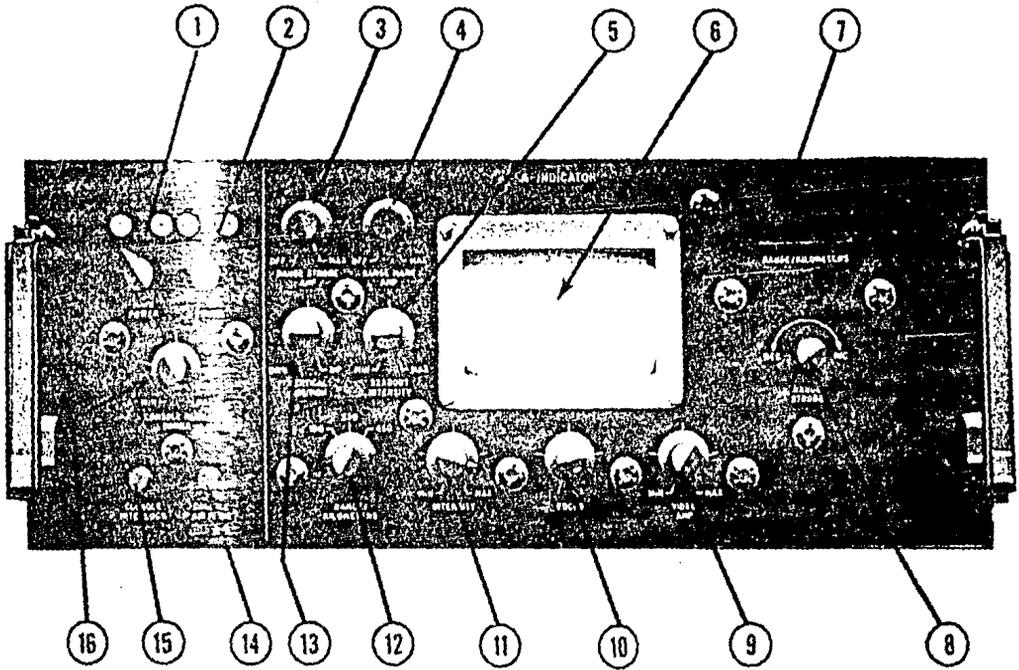


FIGURA III.3 PRESENTACION DEL INDICADOR A Y FOTOGRAFIA DE UN ECO EN LA PANTALLA.

TABLA III.1 CONTROLES DEL INDICADOR A

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
1	Interruptor: ALIMENTACION PRINCIPAL ON/OFF	Conecta o desconecta la alimentación principal.
2	Interruptor: ALIMENTACION DEL SERVO	Permite encender o apagar la alimentación de la unidad del SERVO.
3	Control: ESTROBO DE DISTANCIA	Permite ajustar la amplitud del estrobo de distancia.
4	Control: MARCAS DE DISTANCIA	Permite fijar la amplitud de las marcas del distancia.
5	Control: INTENSIDAD DEL INDICADOR DIGITAL	Control de intensidad del indicador digital.
6	Tubo TRC	Pantalla del Indicador A con TRC.
7	Indicador: DISTANCIA/KILOMETROS	Indicador digital que presenta la distancia del estrobo de 0 a 450 Km. con incrementos de 0.1 Km.
8	Control de posición: ESTROBO DE DISTANCIA	Controla la posición del estrobo de distancia con el valor en Km -- marcado en (7).
9	Control: AMPLITUD DEL VIDEO	Permite ajustar la ganancia del video a la amplitud deseada.
10	Control: FOCO	Permite fijar el foco del barrido a la máxima claridad.
11	Control: INTENSIDAD	Permite fijar la intensidad del barrido a la brillantez adecuada.
12	Interruptor: DISTANCIA/KILOMETROS	Fija la longitud del barrido a las escalas de 100, 230 o 450 Km.
13	Control: POSICION VERTICAL	Permite fijar la posición del barrido verticalmente.

TABLA III. 1 CONTROLES DEL INDICADOR A (CONT)

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
14	Indicador: FLUJO DE AIRE DE LA CONSOLA	Se enciende un foco rojo cuando el flujo de aire de la consola es bajo o nulo.
15	Indicador: SEGURO DE LA CONSOLA	Enciende cuando algun seguro o puerta de la consola está abierto.
16	Control: ILUMINACION DEL PANEL DE LA CONSOLA	Controla la intensidad de las lamparas del panel de la consola.

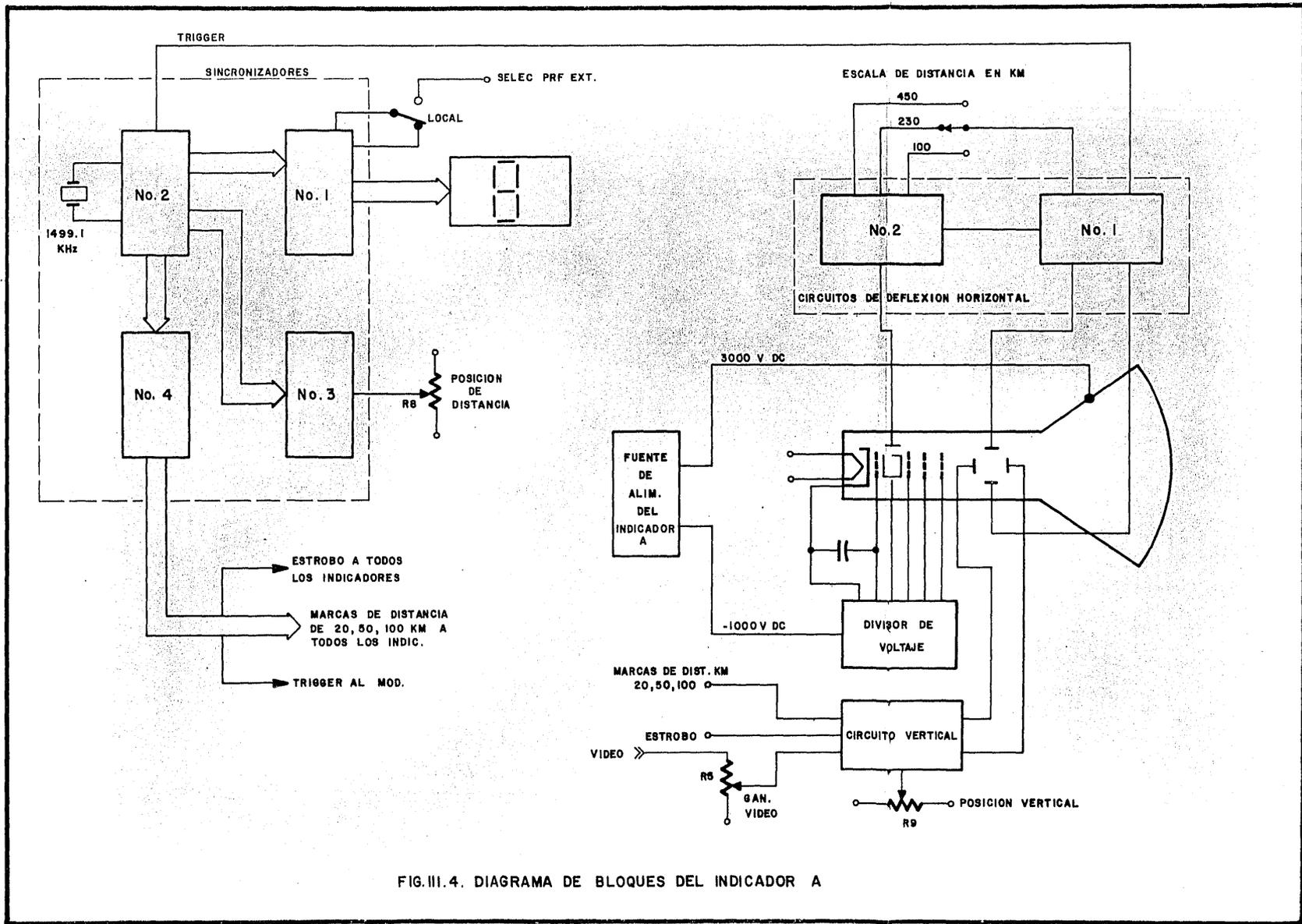


FIG.III.4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL INDICADOR A

El sincronizador No. 2 contiene el oscilador de cristal principal que opera a una frecuencia de 1499.1 KHz dando pulsos cada 0.1 de km y mediante técnicas digitales de división de frecuencia se obtienen marcas de distancia y señales de reloj de 1 km (149.91 KHz), 5 km (29.982 KHz), 10 Km (14.991 KHz), 100 km (1.4991 KHz) y marcas de 20,50 y 100 km.

Este sincronizador también genera el pulso de disparo (trigger) -- del sistema.

La salida del oscilador de cristal es conducida al Sincronizador No. 1 la cual mediante un contador binario se obtiene la señal PRF, al tiempo PRF(*) la cual a su vez regresa al sincronizador No. 2 para generar el trigger.

El sincronizador No. 1 contiene un contador de distancia cuya salida es conducida directamente a un indicador numérico.

El Sincronizador No. 3 contiene un circuito de retardo para la generación del cursor de distancia y otros circuitos de control lógico para la operación de todo el conjunto.

El Sincronizador No. 4 contiene los circuitos lógicos que producen un pretrigger ajustable el cual se conduce al transmisor para compensar el retardo, tanto de propagación a través de los cables entre la consola y transmisor como del propio transmisor.

El conjunto también proporciona aislamiento y amplifica las señales de las marcas de distancia y estrobo.

CIRCUITOS HORIZONTALES

La función de los circuitos horizontales es generar una señal rampa o de barrido para la pantalla del Indicador A cuando es disparado por un pulso de trigger.

La señal rampa forma un diente de sierra cuya duración varía dependiendo de la posición del interruptor de distancia de 100, 230 ó 450 km y es amplificada para ser directamente aplicada las placas de deflexión horizontal del TRC.

* PRF (frecuencia de repetición de pulsos).

CIRCUITO VERTICAL

La función de circuito vertical es combinar el video, el cursor de distancia (estrobo) y las marcas de distancia para amplificarlas a un nivel adecuado y ser aplicadas a las placas verticales de deflexión del TRC del indicador. El control R9 permite situar el barrido horizontal en cualquier posición vertical; otro control R5 permite aumentar o disminuir la intensidad de la señal. Ambos están en el panel frontal de la consola.

FUENTE DE ALIMENTACION

La Figura III.4 muestra la posición del bloque de la fuente de alimentación del Indicador A.

La fuente utiliza 3 convertidores de CD a CD de los cuales a uno se le aplica -28 VCD y los tres producen salidas de alto voltaje de +80, -1000 y +3000 VCD. Por medio de divisores de voltaje se reducen los -1000 VCD a un nivel de alimentación adecuado para las rejillas del TRC.

2.2 INDICADOR DE POSICION EN PLANO: PPI

El PPI es el indicador principal de posición en el sistema de radar y esta situado en el centro de la consola. El indicador es un tubo de 12" con un barrido giratorio variable en distancia de 100, 230 y 450 Km que presenta el video como una área luminosa en la pantalla de fósforo. Los controles de azimut están situados en el panel desde donde se controla de forma automática, manual o remota la posición de la antena en el plano de azimut. La Figura III.5 muestra la presentación del PPI y la Tabla III.2 sus controles.

2.2.1 DESCRIPCION DEL PPI

La Figura III.6 muestra el diagrama de bloques del PPI. Las señales de entrada a la unidad son el trigger, el video y voltajes del sincro del pedestal.

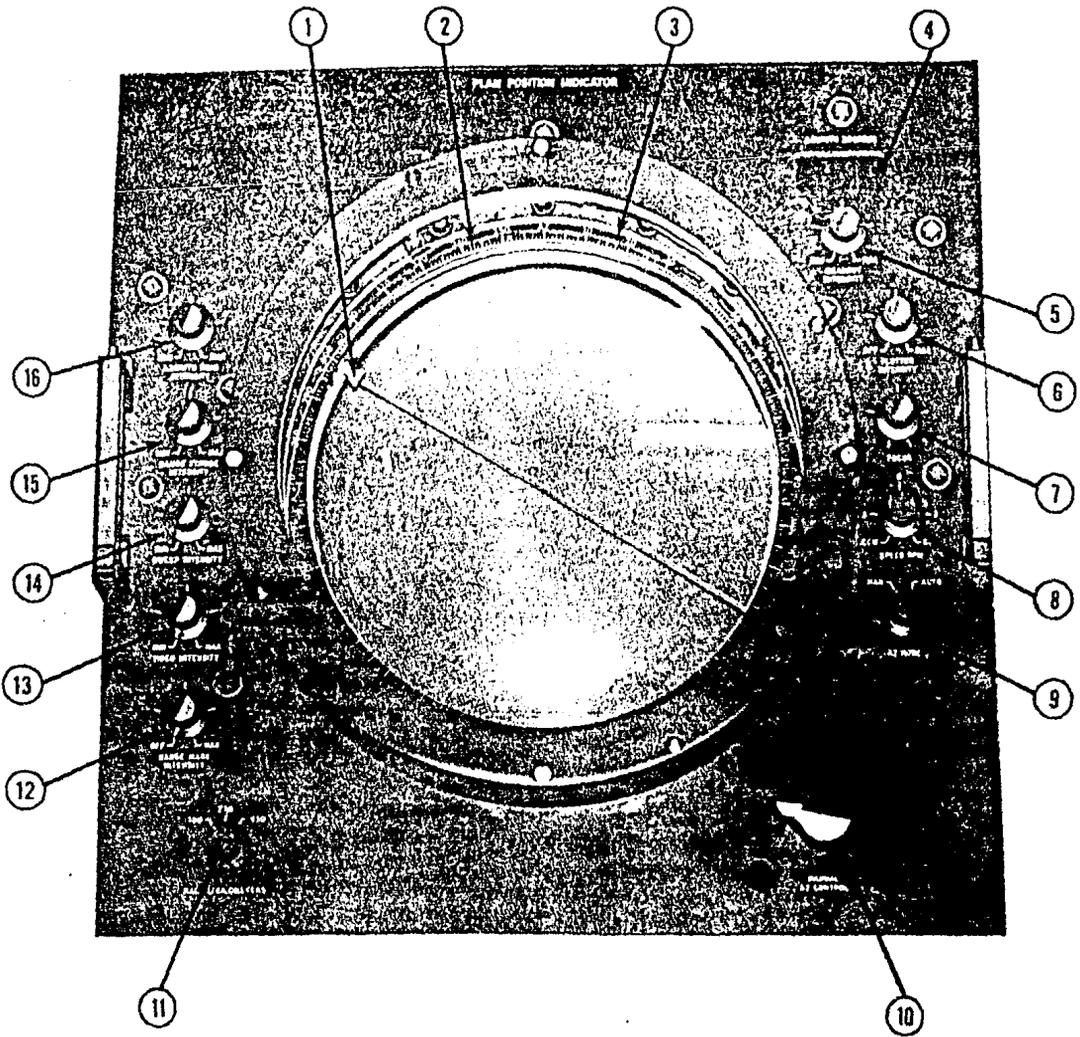


FIGURA III.5 PRESENTACION DEL INDICADOR PPI

TABLA III. 2 CONTROLES DEL PPI

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
1	Apuntador del Curso	Muestra la posición en la cual está dirigida la antena.
2	Cristal Optico	Permite calcar la formación de nubes en mapas.
3	Circunferencia de Azimut	Muestra la posición relativa de la antena hacia el norte verdadero. El aro de azimut está marcado en incrementos de 1 grado.
4	Indicador: GRADOS DE AZIMUT	Indica la posición de la antena digitalmente con incrementos de 0.1 - grados.
5	Control: INTENSIDAD DEL INDICADOR DIGITAL	Controla la intensidad del indicador digital de azimut.
6	Control: INTENSIDAD DEL CRISTAL OPTICO	Controla la intensidad de la luz del cristal óptico.
7	Control: FOCO	Controla el foco del TRC. Normalmente se ajusta a la presentación mas clara.
8	Interruptor: VELOCIDAD RPM	Controla la velocidad de la antena de 0 a 3 y a 5 RPM.
9	Interruptor: MODO AZIMUT	Permite seleccionar el modo de movimiento en azimut de la antena. En modo AUTO el movimiento es controlado con (8), en modo MAN el movimiento es controlado por (10).
10	Volante: CONTROL MANUAL DE AZIMUT	Controla manualmente la posición de la antena, cuando (9) esta en MAN.

TABLA III.2 CONTROLES DEL PPI (CONT.)

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
11	Interruptor: DISTANCIA/KILOMETROS	Controla la distancia que es presentada en las escalas de 100, 230 o 450 Km.
12	Control: INTENSIDAD DE LAS MARCAS DE DISTANCIA	Controla la brillantez de las marcas de distancia.
13	Control: INTENSIDAD DEL VIDEO	Controla la brillantez del video del TRC, mediante la amplitud del video aplicado a la rejilla del TRC.
14	Control: INTENSIDAD DEL BARRIDO	Controla la brillantez de la linea de barrido en el TRC. Normalmente se ajusta a que esté apenas visible.
15	Control: INTENSIDAD DEL CURSOR DE DISTANCIA	Controla la intensidad del estrobo de distancia .
16	Control: INTENSIDAD DEL ARO DE AZIMUT	Controla la intensidad de luz del aro de azimut.

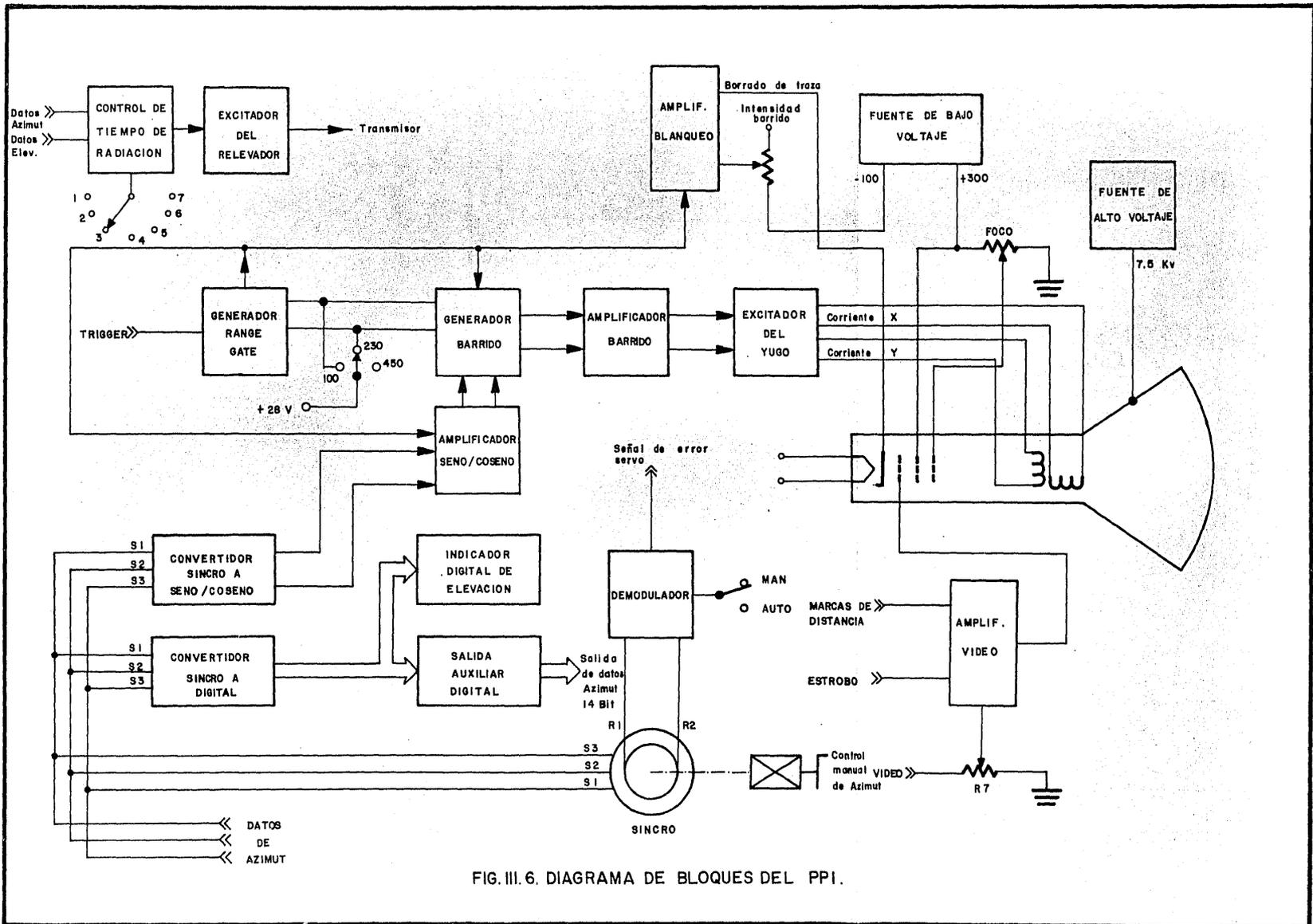


FIG. III. 6. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PPI.

AMPLIFICADOR DE VIDEO

El amplificador de video tiene la función de mezclar el video y las marcas de distancia junto con el estrobo provenientes de los sincronizadores. Antes de ser aplicados a la reja del TRC se amplifican aproximadamente 55 dB.

El control R7 de ganancia de video varía la amplitud de la señal -- aplicada al amplificador, otro control de intensidad de marcas de -- distancia y estrobo varía la amplitud de las marcas aplicadas al -- amplificador.

AMPLIFICADOR SENO/COSENO

El bloque amplificador seno/coseno recibe dos voltajes: seno y coseno del convertidor sincro a seno/coseno, aísla la salida del convertidor de los elementos del circuito y muestrea las señales de seno y coseno para proporcionar los niveles de excitación a el generador de barrido.

El muestreo se realiza de manera que las señales seno/coseno pasen durante el período de la señal RANGE GATE y esten puenteadas a tierra durante el tiempo muerto de dicha señal.

La señal RANGE GATE representa la distancia seleccionada en ancho y permite introducir los voltajes seno y coseno en el generador de barrido en donde se controla la amplitud de las coordenadas X y Y del barrido.

GENERADOR DE LA SEÑAL RANGE GATE

La función del generador de señal RANGE GATE es producir una señal cuadrada negativa cada vez que se aplica un pulso de disparo (tri--

ger) para controlar el tiempo de barrido y de blanqueo en función de la distancia seleccionada para las pantallas PPI y RHI.

La señal se aplica simultáneamente al generador de barrido y al -- amplificador seno/coseno.

GENERADOR DE BARRIDO

El generador de barrido es una unidad de dos canales uno para la se ñal seno y el otro para la señal coseno, siendo ambos idénticos.

Su función es generar dos rampas de voltaje lineal con polaridad - y amplitud determinadas por la polaridad y el nivel de sus señales- de entrada, es decir, producen los barridos X y Y con una ampli-- tud proporcional al seno y coseno del ángulo en dirección de la an tena. La duración de la rampa esta controlada por la duración de_ la señal RANGE GATE. Las salidas del generador activan al amplifi- cador de posición del barrido.

AMPLIFICADOR DE BARRIDO

La función del amplificador de barrido es aislar el generador de - barrido del amplificador del yugo y proporcionar los niveles correc tos de excitación a las bobinas del TRC y de posicionamiento del - barrido.

Este bloque consiste de dos circuitos basicamente idénticos con una entrada extra en uno de ellos para aplicar un voltaje de corrección por curvatura de la tierra que se explicará posteriormente.

EXCITADOR DEL YUGO

El excitador del yugo recibe las señales de barrido seno y coseno_ y proporciona la potencia necesaria para excitar la baja impedencia de las bobinas del yugo del TRC mediante la generación de una co-- rriente lineal.

Cuando los voltajes de barrido son aplicados a las entradas del cir cuito excitador del yugo, un cambio lineal de la corriente es apli

cado a las inductancias del yugo produciendo una traza de barrido lineal que es presentada en el TRC.

AMPLIFICADOR DE BORRADO O DE BLANQUEO

La entrada a este bloque es la señal RANGE GATE de la cual se toma su complemento de tal forma que la traza es solo visible durante el tiempo de barrido y eliminada o borrada durante el tiempo muerto - de la señal Range Gate o aproximadamente 1 cm menos del final de la pantalla.

La señal de borrado también mantiene un brillo constante durante el barrido.

CONVERTIDOR SINCRÓ A SENO/COSENO

Este convertidor recibe los voltajes S1, S2 y S3 del sincro montado en el pedestal y produce voltajes seno/coseno que son proporcionales a la posición de azimut de la antena. La salida de voltajes seno/coseno se aplica directamente al amplificador seno/coseno.

CONVERTIDOR SINCRÓ A DIGITAL

La función de este convertidor es proporcionar la información del ángulo de la antena de 0° a 360° en forma BCD a partir de la información del sincro de la antena, proporcionándose esta información tanto en un indicador numérico como en una palabra de 14 bits para aplicaciones diversas.

CONTROL DE TIEMPO DE RADIACION

Este bloque es un circuito que proporciona protección al personal en cuanto a que evita que el transmisor este radiando por tiempo indefinido, si la antena no se mueve.

El circuito recibe datos de AZ y EL en forma digital, es decir en bits con un incremento de 1 grado. Mediante un contador, cuenta los bits hasta 10. Si recibe menos de 11 cuentas en el tiempo es-

tablecido por el interruptor TIME SET (de 1 a 6 min) el transmisor cambia automáticamente a la condición de STANDBY (condición de espera).

DEMODULADOR

Este bloque así como los sincros indicados en la Figura III.6 son parte integral del PPI y RHI, sin embargo, depende del funcionamiento del Servo y se describirá en el punto 5 de este capítulo.

2.3 INDICADOR DE ALTURA Y DISTANCIA: RHI

El RHI es un indicador que presenta los ecos en un plano cuyo eje horizontal representa la distancia al radar y el vertical la altura del eco detectado con respecto a la altura de la estación.

La pantalla del RHI tiene controles para fijar el eje de distancia en 100, 230 y 450 km, además de una escala para medir la altura de los ecos. Este indicador se muestra en la Figura III.7 y III.7a.

En el gabinete del RHI se tiene un volante manual que controla la elevación de la antena y excita al servo amplificador de elevación y a un indicador numérico que indica el ángulo de elevación de la antena hasta décimas de grado. Los controles se listan en la Tabla

III.3.

2.3.1 DESCRIPCION DEL RHI

El RHI es muy similar al PPI en cuanto a funcionamiento. Tiene las mismas placas como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura III.8 exceptuando el bloque de Control de Tiempo de Radiación que no se utiliza en este indicador y conteniendo circuitos para la corrección por la curvatura de la tierra que no se usan en el PPI siendo esto lo único que se describirá de esta unidad. En el RHI la señal coseno no se usa ya que el barrido horizontal es fijo para todos los ángulos de elevación de la antena y es determinado únicamente por la distancia seleccionada.

GENERADOR DE LA FUNCION DE CORRECCION POR CURVATURA DE LA TIERRA: EEC

Como se mencionó anteriormente, el RHI presenta un corte vertical

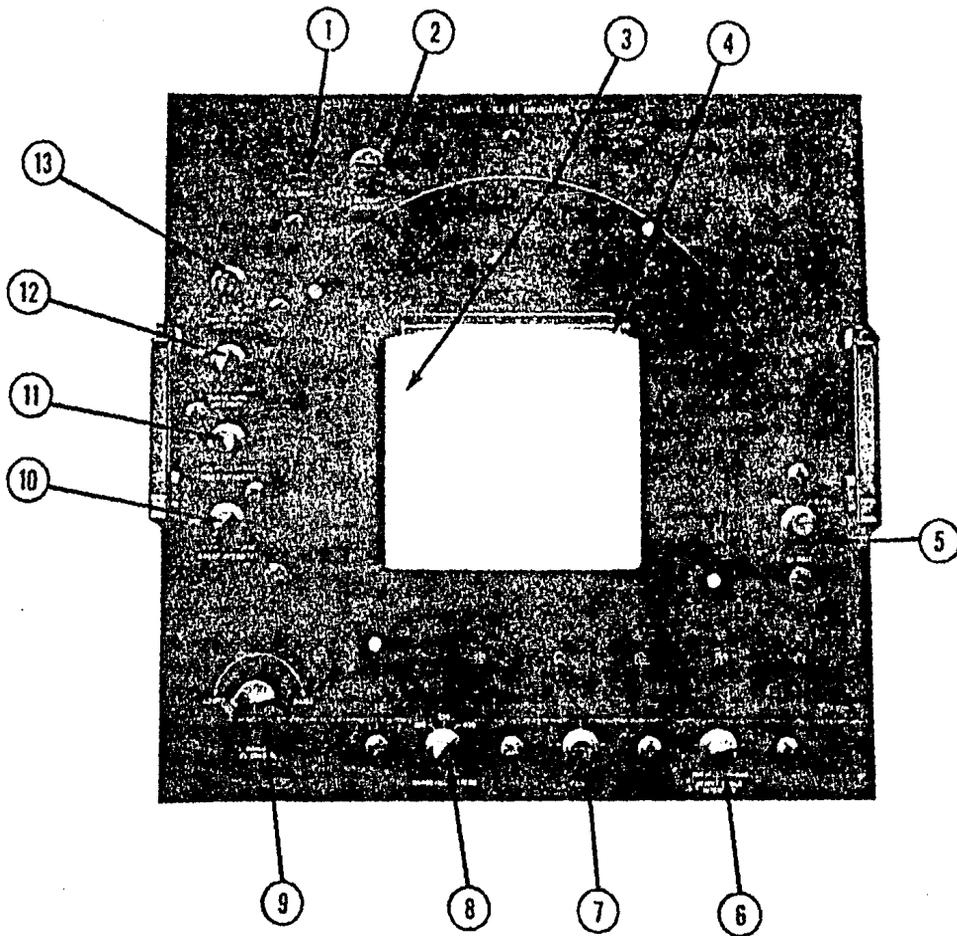


FIGURA III.7 PRESENTACION DEL INDICADOR RHI

TABLA III. 3 CONTROLES DEL RHI

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
1	Indicador: GRADOS DE ELEVACION	Indicador digital de la elevación de la antena.
2	Control: INTENSIDAD DEL INDICADOR DIGITAL	Controla la intensidad del indicador digital (1).
3	Tubo TRC de 12"	Pantalla que presenta la información de distancia-altura.
4	Escala de Altura	Muestra la altura del eco.
5	Interruptor: MODO DE ELEVACION	Selecciona el modo de operación: MANUAL o AUTOMATICO.
6	Control: INTENSIDAD DE LA ESCALA DE ALTURA	Controla la intensidad de la línea de la escala de altura.
7	Control: FOCO	Controla el foco del barrido.
8	Interruptor: DISTANCIA/KILOMETROS	Controla la distancia del barrido en las escalas de 100, 230 o 450 - Km.
9	Volante: CONTROL MANUAL DE ELEVACION	Controla la posición de elevación de la antena.
10	Control: INTENSIDAD DEL BARRIDO	Controla la intensidad del barrido. Normalmente es ajustado para que el barrido sea apenas visible.
11	Control: INTENSIDAD DEL VIDEO	Controla la intensidad del video en el TRC.
12	Control: INTENSIDAD DE LAS MARCAS DE DISTANCIA	Controla la intensidad de las marcas de distancia en relación al barrido.
13	Control: INTENSIDAD DEL ESTROBO DE DISTANCIA	Controla la intensidad del estrobo de distancia.

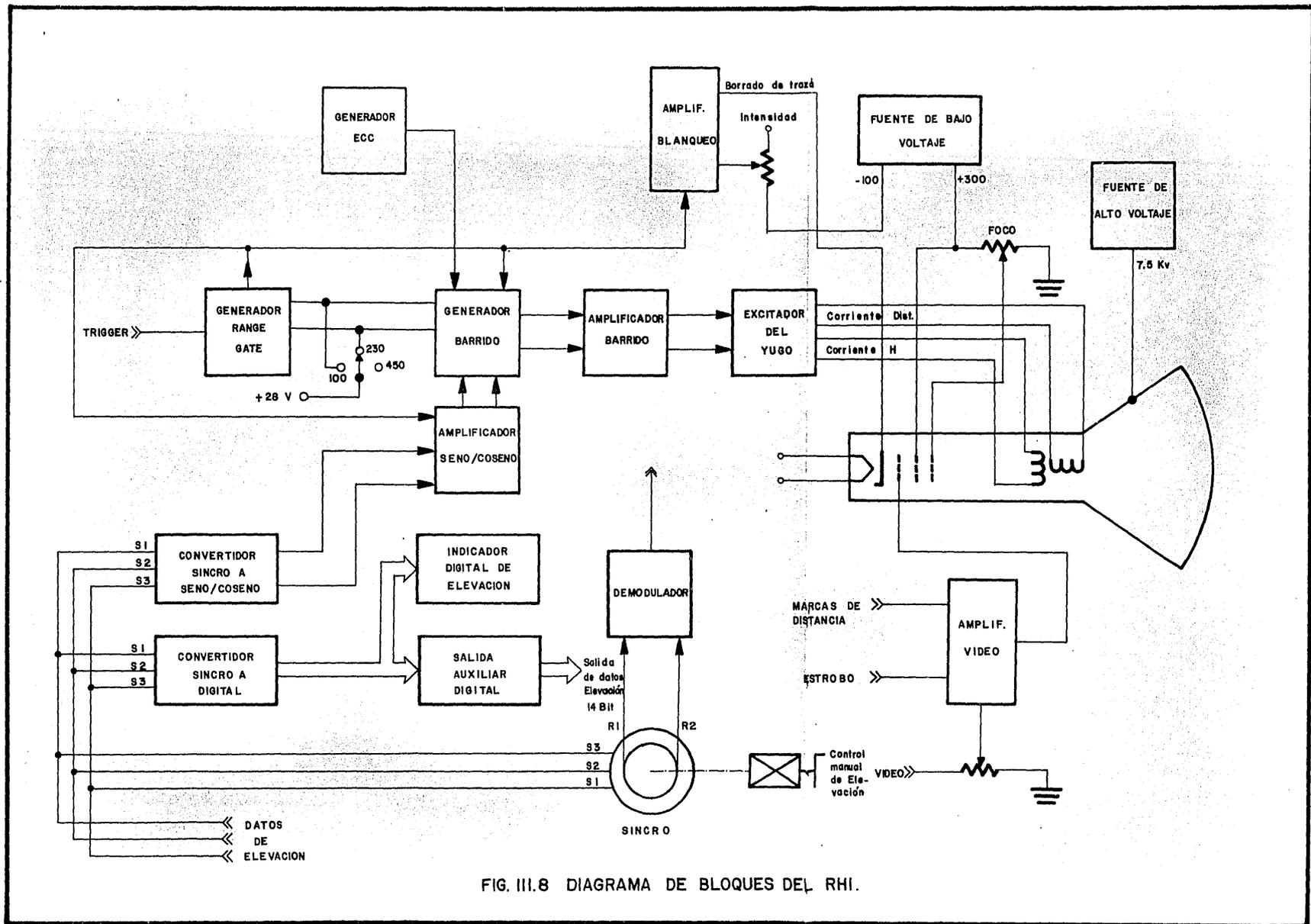


FIG. III.8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RHI.

de los ecos detectados, tal como se muestra en la Figura III.9

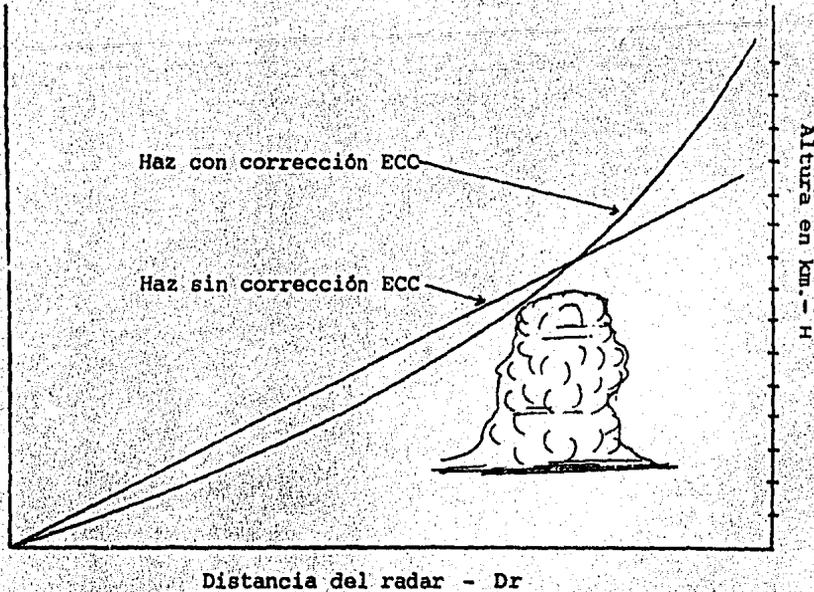


FIGURA III.9 ALTURA DE UN ECO EN EL RHI CON Y SIN CORRECCION ECC. Para corregir la altura debido al ángulo de la antena, se implementa electrónicamente un circuito que simula la siguiente ecuación:

$$H = \frac{D_r^2 \cos^2(E)}{2R_c} + D_r \operatorname{sen} E \quad *$$

La señal de la función para la corrección se aplica al amplificador de barrido vertical por cada pulso de disparo y de esta forma se obtiene una altura corregida por los efectos de la curvatura de la tierra y de la propagación estándar, observándose que la traza del barrido del RHI es curva.

Se cuenta en el RHI con un interruptor que permite desconectar la corrección, obteniéndose un barrido recto que permite leer en la escala vertical de la pantalla una altura sin correcciones.

*La explicación de esta ecuación se hace en el párrafo 6.11 del capítulo II.

2.4 PROCESADOR E INTEGRADOR DIGITAL DE VIDEO: DVIP

El DVIP es un sistema de adquisición y procesamiento de datos digitalizados de alta velocidad. Puede ser calibrado para detectar y presentar 6 niveles discretos de precipitación.

La presentación de los seis niveles de precipitación en las pantallas se hace por medio de tres tonalidades de "gris" y se le llama Video Contorneado siendo de gran utilidad para los meteorólogos en el análisis de las señales retornadas hacia el radar.

El DVIP continuamente promedia la señal de video logarítmico producida por el receptor del radar, tanto en distancia y dirección de la exploración de la antena, utilizando técnicas de integración digital en sincronía con el pulso de disparo (trigger) del sistema de radar para obtener estimaciones cuantitativas de la precipitación instantánea detectada, mejorando la exactitud de las estimaciones con respecto a las obtenidas solamente con un receptor logarítmico. La Figura III.10 muestra la presentación del DVIP.

Las características del DVIP son las siguientes:

- 1). Acepta el video logarítmico con un rango dinámico mínimo de 80 dB.
- 2). Continúa integrando las muestras de video logarítmico digitalmente, en distancia y de pulso a pulso, basándose en incrementos de distancia de 1 o 2 km en el intervalo de 0 a 450 km.
- 3). Proporciona una función fija de normalización en distancia llamada STC como una parte integral del procesamiento digital.
- 4). Proporciona una salida de video logarítmico contorneado que consiste de 6 contornos de la intensidad de la señal media, presentándolo en las pantallas del radar.
- 5). Proporciona una salida digital separada consistente de una palabra binaria de 8 bits para cada muestra de video integrado.
- 6). Ejecuta otras funciones necesarias para integrar una unidad operacional.

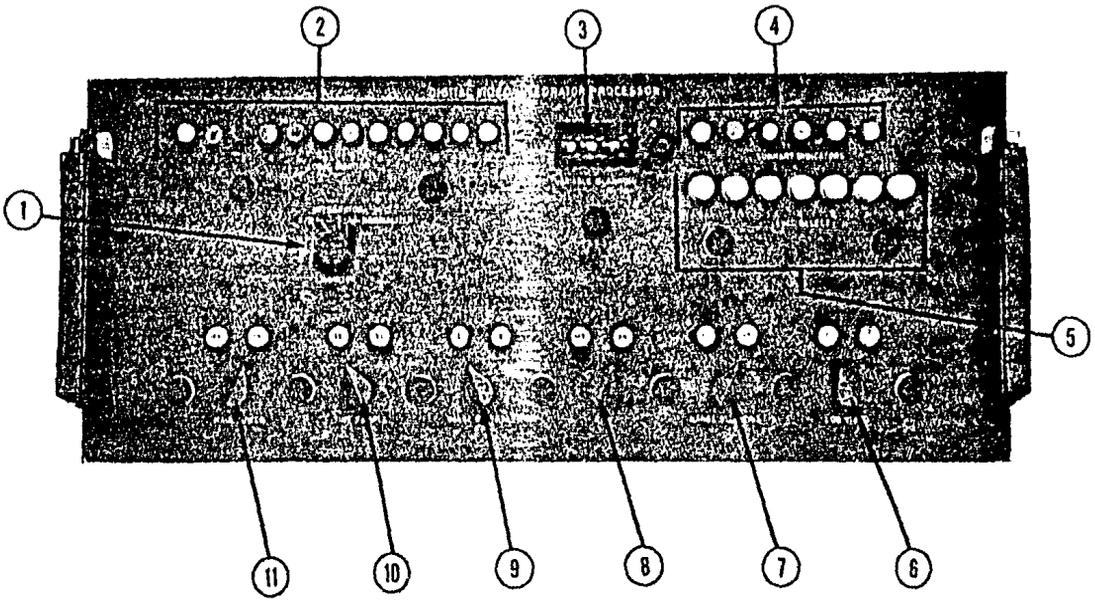


FIGURA III.10 PRESENTACION DEL DVIP

TABLA III. 4 CONTROLES DEL DVIP

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
1	Interruptor: MONITOR	Selecciona tres posiciones y las monitorea con (2). En la posición A/D presenta la salida del convertidor A/D en 8 lamparas. En la posición INTEGRADOR presenta la salida del integrador con las 12 lamparas. En la posición NORMALIZER presenta los niveles con la función STC en 8 lamparas.
2	Lamparas indicadoras: MONITOR LOGICO	Lamparas que presentan en código binario el nivel de la señal según esté puesto (1).
3	Interruptor: BLANQUEO VARIABLE	Interruptores que fijan la distancia a ser borrada.
4	INDICADORES DE NIVEL	Indican los niveles de la señal de video que esta siendo integrada y presentada.
5	Indicador: SELECTOR DE NIVEL	Proporciona a las pantallas unicamente el nivel o niveles seleccionados. El interruptor R restaura los niveles.
6	Interruptor: VIDEO LOGARITMICO	Selecciona las presentaciones de video NORMAL LOG. o LOG. CONTORNEADO.
7	Interruptor: BLANQUEO DE DISTANCIA	Permite seleccionar la posición de blanqueo de distancia. En la posición FIJA, la presentación es borrada de 0 a 20 Km. En la posición VARIABLE se borra de 0 a 100 Km. dependiendo de la posición de (3).

TABLA III.4 CONTROLES DEL DVIP (CONT.)

NUM. DE REFERENCIA	CONTROL O INDICADOR	FUNCION
8	Interruptor: STC	Selecciona la función de normalización en distancia.
9	Interruptor: INTERVALO DE DISTANCIA	Controla el tamaño de muestreo. selecciona el promedio de 4 muestras en 1 Km u 8 muestras en 2 Km.
10	Interruptor: MUESTRAS DE TIEMPO	Selecciona 15 o 31 muestras a promediar en tiempo.
11	Interruptor: ALIMENTACION PRINCIPAL --	Controla la alimentación de línea al DVIP.

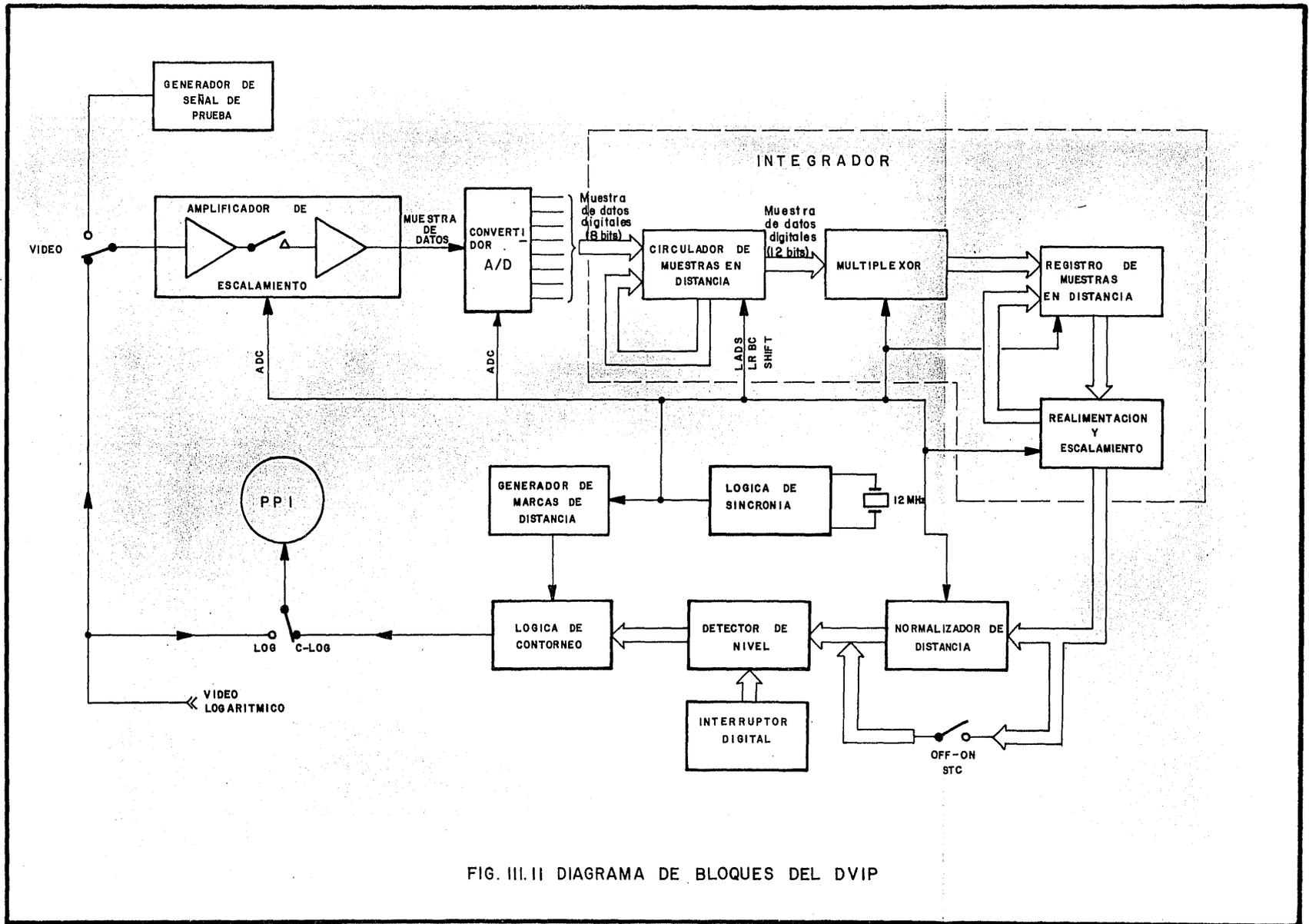


FIG. III. II DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DVIP

El DVIP incluye un monitor lógico para utilizarse en la calibración y en los problemas de falla. El monitor permite verificar rápidamente la operación de las tres principales divisiones de la unidad. La conversión analógica-digital, la integración del video y la normalización en distancia. Una lista de los controles se da en la Tabla III.4

2.4.1 DESCRIPCION DEL DVIP.

La Figura III.11 muestra el diagrama de bloques del DVIP, el funcionamiento se describe a continuación y se hace referencia a dicha figura.

GENERADOR DE SEÑAL DE PRUEBA.

Este bloque, conjuntamente con el monitor lógico, permite verificar rápidamente si el sistema esta funcionando normalmente sin señales de radar.

El módulo tiene basicamente dos modos de operación:

- 1). Operación en corrimiento libre
- 2). Operación con el pulso de disparo (trigger) del sistema.

La función en ambos modos de operación es la misma: Generar una señal Rampa de prueba con período de 500 μ seg.

En ausencia del pulso de disparo del sistema, como en el caso en que el DVIP esta bajo prueba, el generador de señal de prueba opera en el modo de corrimiento libre, generando la señal rampa y además un pulso de 2 μ seg que es utilizado como el trigger para el resto del DVIP.

Utilizando el pulso de disparo del sistema unicamente se genera la señal de prueba.

AMPLIFICADOR DE ESCALAMIENTO

La función de este bloque es la siguiente:

- 1). Recibir el video logarítmico o la señal de prueba para ser amplificadas. La señal amplificada es muestreada cada vez que aparece un pulso de sincronía de suficiente duración para poder tomar una muestra del video. -

El muestreo del video ocurre cada cuarto de kilómetro de distancia, es decir cada 1.66 Useg.

$$T = \frac{2r}{C} = \frac{2(.25) \text{ km}}{3 \times 10^5 \text{ km/seg}} = 1.66 \text{ Useg.}$$

Con la señal de prueba (500 Useg) se obtiene aproximadamente 300 - muestras en cada rampa lo que permite reproducir una buena réplica de la señal, esto es:

$$\frac{500}{1.66} \approx 301 \text{ muestras}$$

CONVERTIDOR A/D

Las muestras de datos del video logarítmico analógico pasan a un convertidor analógo-digital que es en este caso, un módulo encapsulado y convierte el vaior analógico de la muestra a su equivalen te digital en una palabra de 8 bits, la cual es almacenada en re-- gistros de corrimiento (shift register). Cada muestreo requiere - de aproximadamente 1.0 Useg para la conversión. Los datos son -- muestreados una vez cada 250 m de distancia o aproximadamente 1.66 microsegundos tal como se indicó anteriormente.

2.4.2 INTEGRACION: TECNICA DE PROMEDIO

Debido a que la varianza inherente de los ecos de precipitación -- es de aproximadamente 5.57 dB a la salida del receptor logarítmico es necesario realizar un promedio de las muestras para proporcinar una mejor estimación de la media de la intensidad de la señal con una exactitud adecuada para la interpretación meteorológica. Realizando el promedio de las muestras, la desviación de la media es-- timada puede reducirse a 1 dB con al menos 31 muestras independien tes, esto es:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad * \quad (3.1)$$

donde:

$\sigma_{\bar{x}}$ = Desviación de la medida de las muestras

* Apéndice A

σ = Desviación de la población ó de todas las --
muestras

N = Número de muestras.

para este caso:

$$N = \frac{\sigma^2}{\sigma_x^2} = \frac{(5.57)^2}{(1)^2}$$

N = 31 muestras.

Estas son las muestras que deben ser procesadas por el DVIP para_ obtener una media estimada con una desviación estándar de 1.0 dB.

Si el incremento de distancia especificado es de 1 km (6.67 micro seg) hay 2.22 muestras independientes de 3 microseg (duración del pulso del radar) en esa distancia. Si al menos 31 muestras independientes deben ser procesadas por el DVIP para proporcionar una $\sigma_{\bar{x}}=1.0$ dB, entonces $31/2.22 = 14$ es el número mínimo de muestras de tiempo de pulso a pulso que deben ser procesadas en el integrador digital (Figura III.12).

Si el incremento en distancia especificado es de 2 km entonces -- 4.45 muestras independientes de distancia dan una desviación de:

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \frac{5.57 \text{ dB}}{\sqrt{(4.45)(14)}} = 0.71 \text{ dB}$$

considerando como en el caso anterior, 14 muestras pulso a pulso.

Para obtener la varianza estimada determinada anteriormente, se realiza un "promedio en distancia" (un promedio tomado de varias_ muestras de un volumen en distancia) o un "promedio en tiempo" (un promedio tomado de varios pulsos retornados desde la misma mues-- tra de volumen) o una combinación de los dos métodos.

La técnica combinada (promedio o integración en distancia y en -- tiempo) es la más adecuada ya que reduce el número de muestras -- obtenidas por cualquiera de los dos métodos solos y produce mayor_ flexibilidad en la selección de dimensiones del volumen sobre el_ cual el promedio se esta haciendo (volumen promediado), además de

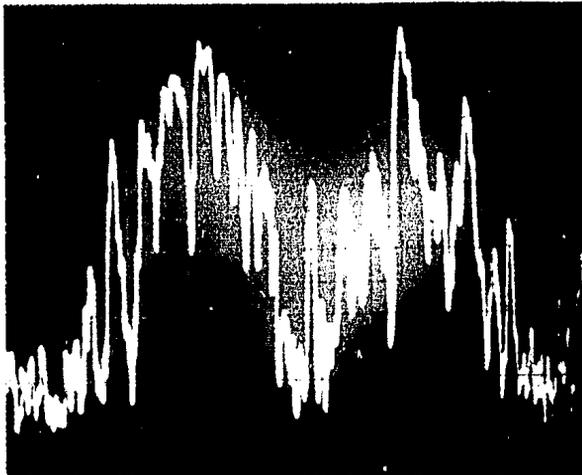
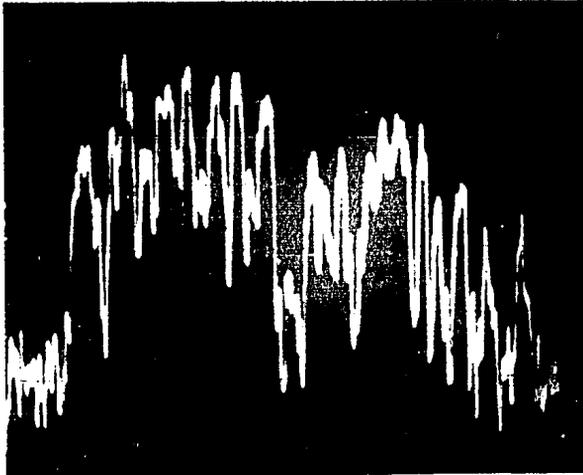


FIGURA III.12 FOTOGRAFIAS DE PULSOS DE RADAR CONSECUTIVOS.

LAS FOTOGRAFIAS ANTERIORES FUERON TOMADAS CONSECUTIVAMENTE DEL ECO PRODUCIDO POR UNA NUBE, ESTANDO LA ANTENA EN UNA POSICION FIJA. CON DICHAS IMAGENES ES POSIBLE DEMOSTRAR LA INDEPENDENCIA ESTADISTICA DE LAS MUESTRAS QUE SE PROMEDIARAN EN EL INTEGRADOR, YA QUE ES BASTANTE NOTORIO LA VARIABILIDAD DEL ECO EN LOS PULSOS SUCESIVOS.

que es la más eficaz para obtener una desviación de 1 dB. La Figura III.13 muestra el diagrama de bloques del integrador digital con el cual se ejecuta la integración en el DVIP.

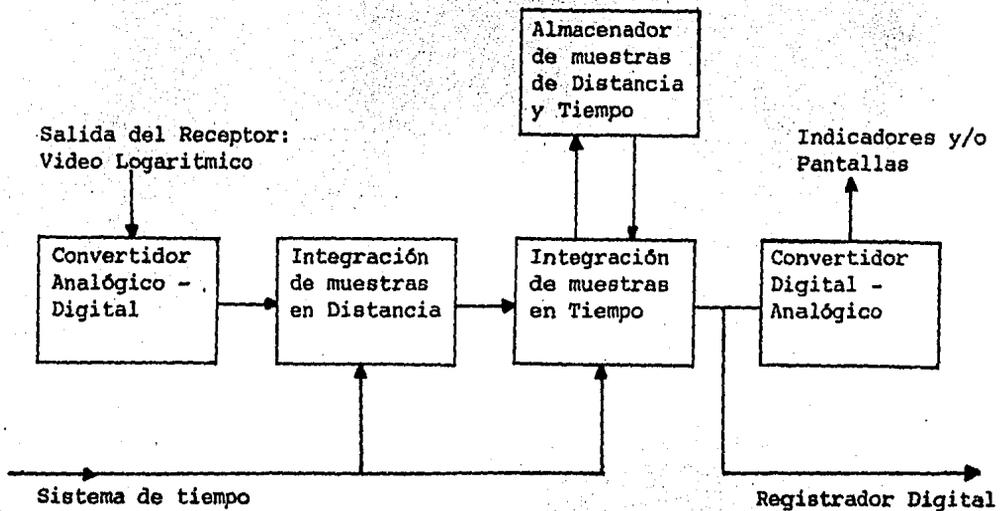


FIGURA III.13 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL INTEGRADOR DIGITAL

PROMEDIO EN DISTANCIA

La operación que se realiza para promediar en distancia consiste de un promedio lineal de un número predeterminado ($N_R = 4 \text{ ó } 8$) de muestras en distancia.

$$V_o = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} V_i \quad (3.2)$$

El valor de N_R se restringe a una potencia de 2, para que la división en (3.2) sea realizada por el corrimiento de un bit implementando con registros de corrimiento o multiplexores.

PROMEDIO EN TIEMPO

La operación que se realiza para la integración en tiempo requiere la implementación del algoritmo de un filtro paso baja digital ---

mostrado en la Figura III.14, dicho algoritmo esta dado por la siguiente relación:

$$V_{on} = B \cdot V_{in} + (1-B) V_{o(n-1)} \quad (3.3)$$

donde:

$B = 2^{-n}$ Determina la rapidez de la curva.

V_{in} - Enésima muestra de entrada (a la salida del circuito integrador en distancia).

$V_{o(n-1)}$ - La salida despues de (n-1) muestras.

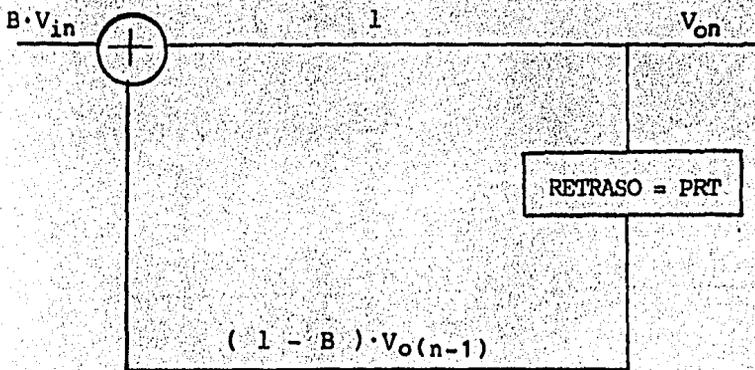


FIGURA III.14 FILTRO DIGITAL PASO BAJAS PARA LA INTEGRACION EN TIEMPO

Haciendo iteraciones con la relación (3.3) se obtiene a la salida del filtro el promedio de las muestras de entrada. El número de iteraciones o pasos para que el voltaje de salida llegue el 90% del promedio depende del valor determinado para la constante B. Ya que $B = 2^{-n}$, si $n=3$ en 16 pasos se llega al 90% del promedio. Si $n=4$ es necesario iterar en 31 pasos, lo que indica que el tiempo para promediar es mas lento. La Figura III.15 muestra las curvas de iteración para diferentes valores de n ó B .

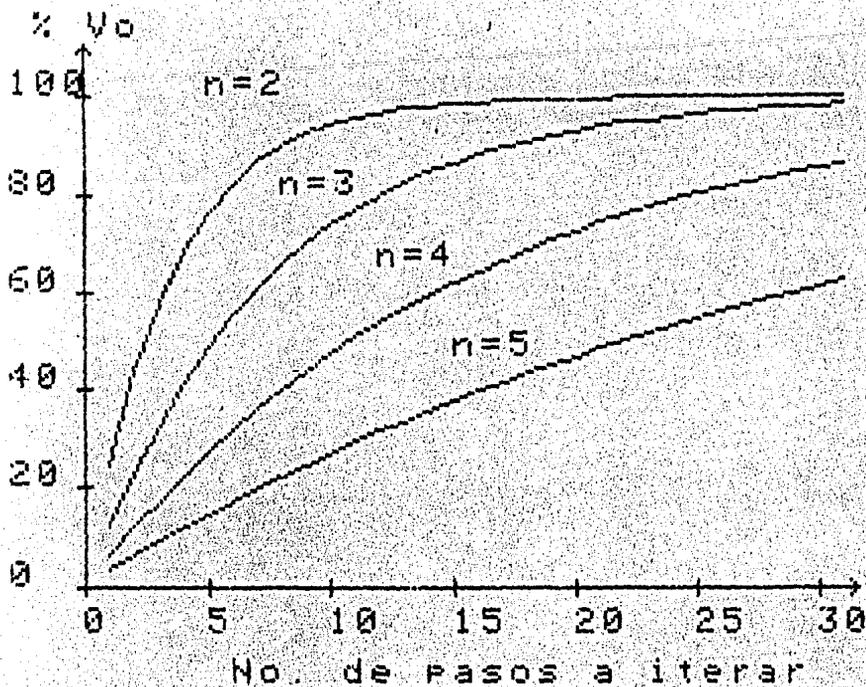


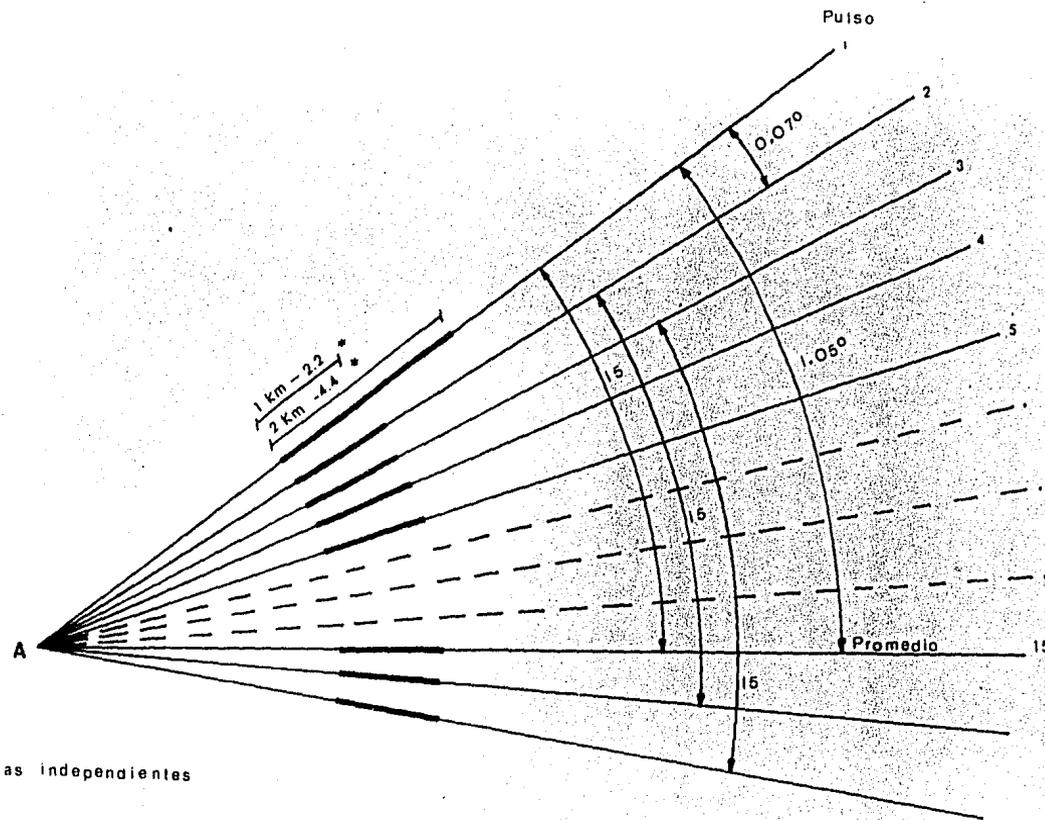
FIGURA III.15 CURVAS DE PROMEDIO PARA DIFERENTES VALORES DE LA CONSTANTE 'B'.

Cada pulso del radar que se presenta a la salida del integrador es el resultado del proceso efectuado durante 15 pulsos anteriores, tal como se esquematiza en la Figura III.16, esto es, el promedio se lleva a cabo continuamente cada 15 pulsos tomando en cuenta los 14 anteriores.

Los bloques de la Figura III.11 que realizan el proceso completo de la integración se describen en los párrafos siguientes:

CIRCULADOR DE MUESTRAS DE DISTANCIA

Los datos digitales que representan el nivel de la muestra analógica del convertidor A/D llegan a la entrada del circulador de muestras de distancia. La primera muestra es cargada en un registro -



* Muestras independientes

FIG. III.16 ESQUEMA DEL PROMEDIO EN TIEMPO

digital y se le suma un "cero". Esta muestra es realimentada o --recirculada para ser sumada con la segunda muestra y se repite el proceso de circulación hasta la cuarta muestra.

El promedio de las 4 muestras en cada kilómetro u 8 muestras en 2 kilímetros, se realiza en circuitos digitales por el corrimiento de los datos en multiplexores posteriores al circulador lo cual es equivalente a mover el lugar del punto decimal binario o dividir --por 2,4,8 ó 16, en este caso 4 u 8, según se desee.

MULTIPLEXOR

Este bloque consta de 2 placas multiplexores, cuya función es equi--valente a la de un interruptor de 4 polos 2 tiros (salidas) y realiza la integración en distancia. En una de las placas la salida es controlada por el interruptor de intervalo de distancia* (promedio de 4 muestras en 1 km u 8 muestras en 2 km) y en la 2a. placa su salida es controlada por el interruptor de muestras de tiempo*--(15 ó 31). Los multiplexores son conectados de tal forma que realizan una división con un corrimiento de datos lo cual es equiva--lente a recorrer el punto decimal binario o hacer el promedio de 4 u 8 muestras.

ALMACENADOR BINARIO DE DISTANCIA Y REALIMENTACION ESCALADA

Estos dos bloques (Figura III.11) son la parte principal de integra--ción de video del DVIP. Esta compuesto esencialmente de circui--tos integrados multiplexores, sumadores y registros de corrimiento que almacenan 256 ó 512 palabras de 12 bits. El interruptor de --muestras de tiempo* selecciona 15 ó 31 pasos en la curva de inte--gración. Cada paso cubre un pulso de repetición.

El almacenador de muestras de distancia y el bloque de realimenta--ción de escala forman un lazo cerrado donde los multiplexores, suma--dor y almacenador operan bajo el control de un comando enviado des--de los contadores de sincronización de la Lógica de Sincronía. La Figura III.17 muestra el diagrama de bloques que ejecuta la inte--gración en tiempo (ecuación 3.3) mas detalladamente.

* Interruptores situados en el panel frontal del DVIP en la consola con dos po--siciones: 1 ó 2 km y 15 ó 31 muestras de tiempo respectivamente.

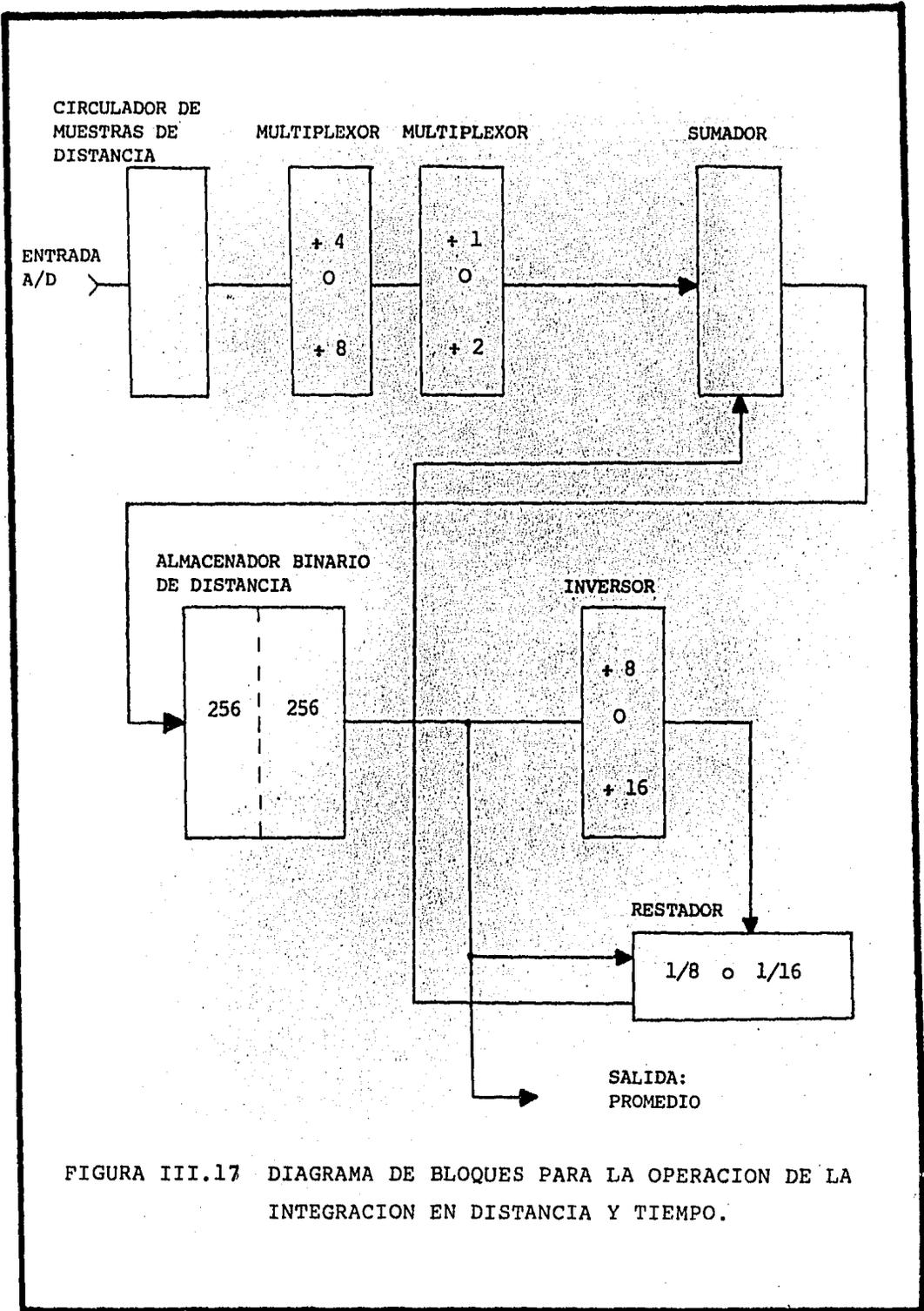


FIGURA III.17 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA OPERACION DE LA INTEGRACION EN DISTANCIA Y TIEMPO.

NORMALIZADOR DE DISTANCIA

Este bloque tiene la función de compensar las señales de video integradas, debido a la atenuación producida por la distancia. La función de normalización de distancia es automáticamente deshabilitada cuando las señales abajo del nivel 2 de precipitación están siendo procesadas, así mismo, la normalización no se aplica a señales a -- distancias mayores de 230 Km.

La normalización en distancia proporciona una corrección de $1/R$ -- (R - Distancia del radar), con 0dB a 230 Km y una corrección de 21 dB a 20 Km. La corrección de 0 a 21 dB es aplicada en incrementos de $1/2$ dB. La función de normalización se utiliza principalmente para la calibración de los niveles de precipitación de disparo, de tal forma que el nivel de disparo No 1 no está normalizado y los niveles del 2 al 6 sí quedan normalizados en distancia.

Un interruptor situado en el panel frontal de la consola (STC) controla la normalización. Cuando está en posición de desconectado -- (OFF), las señales de video son transmitidas sin cambio.

DETECTOR DE NIVEL

Seis niveles de precipitación pueden ser detectados. Los detectores consisten de 6 pares de comparadores digitales los cuales comparan el nivel de video del normalizador de distancia con un valor de los interruptores digitales miniatura de 8 posiciones que pueden -- ser fijados digitalmente en pasos de $1/2$ dB. Cualquier sección del interruptor puesta en ON ó cerrado tiene un valor de cero. Las secciones del interruptor en OFF ó abierto tienen el valor que se muestra a continuación:

SECCION DEL INTERRUPTOR	1	2	3	4	5	6	7	8
ON	0	0	0	0	0	0	0	0
OFF	64	32	16	8	4	2	1	$1/2$

El nivel detectado en dB será la suma de todas las secciones del in

interruptor puestas en OFF. El nivel exacto de cada detector se fija de acuerdo a especificaciones del sistema.

GENERADOR DE MARCAS DE DISTANCIA

El generador de marcas de distancia utiliza 6 pares de comparadores digitales los cuales comparan cuentas de distancia en incrementos - de 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 y 256 Km con un valor prefijado en interruptores miniatura digitales de 8 posiciones. Cualquier sección - del interruptor puesta en ON tiene un valor de cero. Las secciones del interruptor en OFF o abierto tienen un valor en Km que se muestra a continuación:

SECCION DEL INTERRUPTOR	1	2	3	4	5	6	7	8
ON	0	0	0	0	0	0	0	0
OFF	256	128	64	32	16	8	4	2

La salida del generador son pulsos cuadrados que representan las -- marcas de distancia, usando como base 6.6 useg por Km de radar y al tiempo que se lista a continuación:

- Marca de 20 Km aparece a 133.4 useg.
- Marca de 230 Km aparece a 1534.1 useg.
- Marca de 330 Km aparece a 2201.1 useg.
- Marca de 450 Km aparece a 3001.5 useg.

LOGICA DE CONTORNO

Las señales de los seis niveles salen del detector de nivel hacia - el bloque de Lógica de Contorno. Se le llama Contorneo al video de los niveles de precipitación en las pantallas del radar, presentando el nivel de precipitación 1 como gris, el nivel 2 como brillante y el 3 como negro, repitiendose los tonos para los tres siguientes niveles, es decir, el nivel 4 es presentado como gris, el nivel

5 como brillante y el nivel más alto o 6 como negro. Una representación de las tonalidades de los niveles se muestra en la Figura - III.18

Los tonos de gris y brillante son señales de pulsos cuadrados siendo la primera señal de menor amplitud que la segunda (Figura III.18)

Las señales de los niveles gris y brillante puede ser individualmente ajustados para obtener el mejor contraste en la pantalla.

Las señales de los seis niveles salen del detector de nivel hacia la Lógica de Contorno.

Los niveles 1 y 4 son niveles gris que combinados por medios electrónicos forman la señal cuadrada, de la misma forma los niveles brillante 2 y 5 generan otra señal cuadrada.

Las dos señales y las marcas de distancia son mezcladas y amplificadas para ir directamente a la pantalla del PPI.

Un interruptor situado en el panel frontal de la consola controla la presentación de Video normal o logarítmico y Video Contorneado.

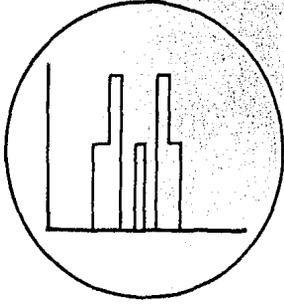
LOGICA DE SINCRONIA

Este bloque es el que controla y genera los tiempos para que los demás (Figura III.11) funcionen correctamente. Utiliza como base de tiempo un oscilador de 12 MHz que opera continuamente con un período de 83 microseg.

La lógica de sincronía proporciona las siguientes funciones por métodos digitales.

- 1). Generar pulsos cuadrados que representan las cuentas de distancia de 1,2,4,8,16,32,64,128 y 256 km, para el generador de marcas de distancia.
- 2). Generar varios pulsos de sincronía tales como:
 - ADC - Comando generado a partir del oscilador de cristal, usado en el convertidor A/D y en el amplificador de escala para trasladar en valor analógico de la muestra al equivalente decimal.

INDICADOR A



INTENSIDAD DE PRECIPITACION

Muy ligera

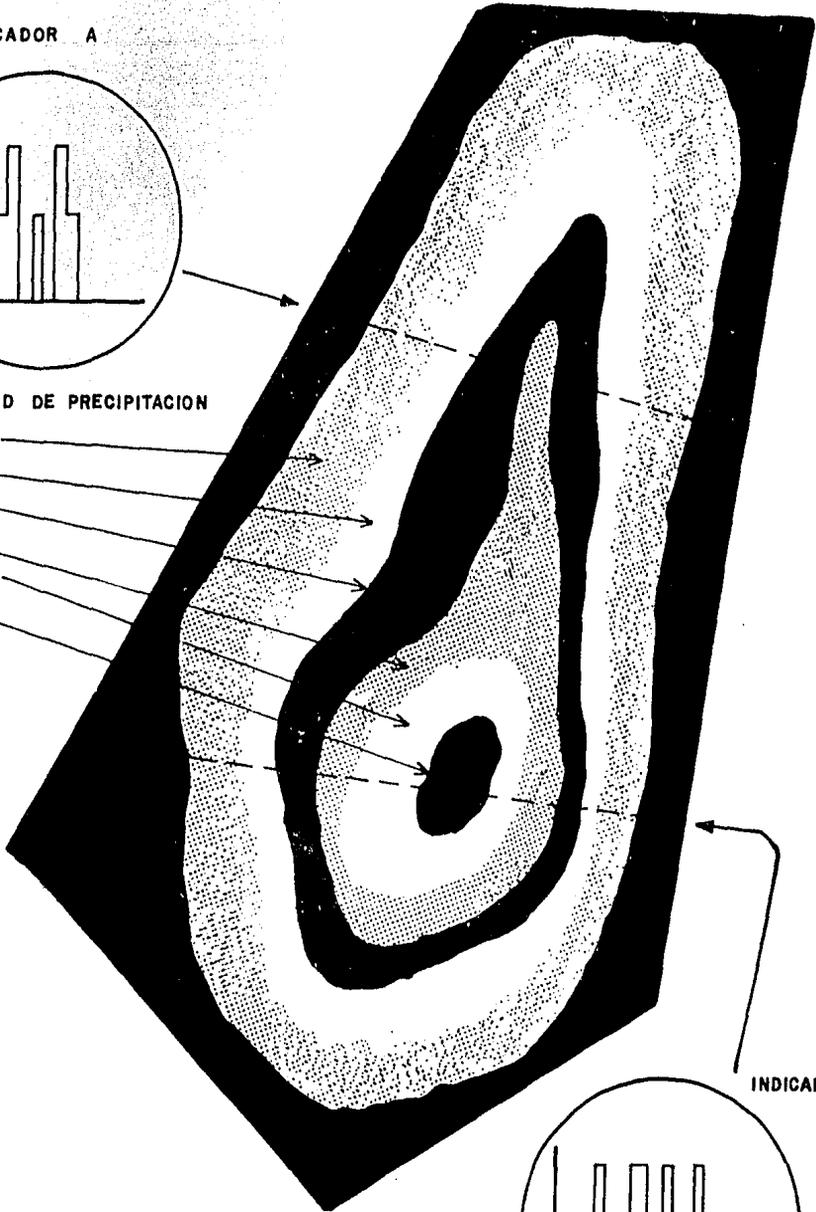
Ligera

Moderada

Fuerte

Muy fuerte

Extrema



INDICADOR A

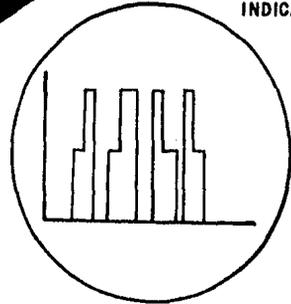


FIG. III. 18 TONALIDADES DE LOS SEIS NIVELES DE INTENSIDAD

LADS - Tren de pulsos positivos de 512 km de duración, -
cada pulso es de 54 microsegundos de ancho y ocu
rre al final de cada conversión A/D.

LRBC - Señal cuadrada que cuenta 4 o 8 muestras.

SHIFT - Señal cuadrada que da un pulso cada 4 o cada 8 -
muestras.

Además se generan otros pulsos de sincronía para el buen funciona-
miento del sistema.

2.5 AMPLIFICADORES-DISTRIBUIDORES

Son dos los amplificadores-distribuidores y están contenidos dentro
de la consola como se muestra en el diagrama de la Figura III.1

AMPLIFICADOR DISTRIBUIDOR DEL TRIGGER

Este amplificador está compuesto de seis canales amplificadores --
iguales excitados por una línea común que es la entrada del pulso
de disparo generado en el Indicador A.

Las salidas de 3 amplificadores son distribuidas a los indicadores
PPI, RHI y al DVIP.

Los 3 canales restantes son salidas a conectores auxiliares de che-
queo y monitoreo.

Además, contiene un canal adicional que amplifica el trigger que -
excita el modulador del transmisor-receptor.

AMPLIFICADOR-DISTRIBUIDOR DE VIDEO

Las funciones del amplificador distribuidor de video son las si- -
guientes:

- 1). Aceptar el video diferencial del transmisor-receptor para
transformarlo y amplificarlo a una sola línea la cual -
alimentará al DVIP.
- 2). Aceptar el video procesado del DVIP para amplificarlo -
y distribuirlo a seis canales diferentes, tres de los -
cuales son para los indicadores A, PPI y RHI y los - -
otros 3 restantes son aplicados a conectores de salida_
auxiliares de video.

2.6 DIAGRAMA DE TIEMPOS DE LAS SEÑALES PRINCIPALES

Para tener una idea clara de la sucesión de la señal de disparo así como de las señales principales de sincronización, la Figura III.19 muestra un diagrama el cual relaciona el tiempo de cada señal con la distancia representativa en los indicadores.

El tiempo de ocurrencia de las señales principales de sincronía y de disparo determinan la ocurrencia de todos los eventos del sistema.

El elemento principal de tiempo es un oscilador que produce pulsos a una frecuencia de 1499.1 KHz que equivale a una distancia de:

$$d = \frac{c}{2 \cdot f} = \frac{3 \times 10^5}{2 (1499.1 \times 10^3)} = 0.1 \text{ Km}$$

entre pulsos sucesivos y es la resolución del subsistema de distancia usado para determinar la distancia de radar. La frecuencia básica es contada hacia abajo por medio de contadores digitales para producir pulsos de 14.991 KHz ó 10 Km entre pulsos sucesivos. Así mismo esta frecuencia es disminuida para producir las marcas de distancia de 20 Km con una frecuencia de 7.4955 KHz. Las marcas de distancia de 50, 100, 230 y 450 Km son producidas de la misma forma con frecuencias de 2.99, 1.49, 0.652 y 0.33 KHz respectivamente.

Del oscilador principal también es generado el pulso de disparo principal para los indicadores con una frecuencia (PRF) de 259 Hz además de un pretrigger para el transmisor el cual compensa el retraso de propagación y de la línea de transmisión.

La señal 'Range Gate' es la que controla el barrido y conjuntamente con la del amplificador de blanqueo para las diferentes distancias (100, 230 ó 450 Km).

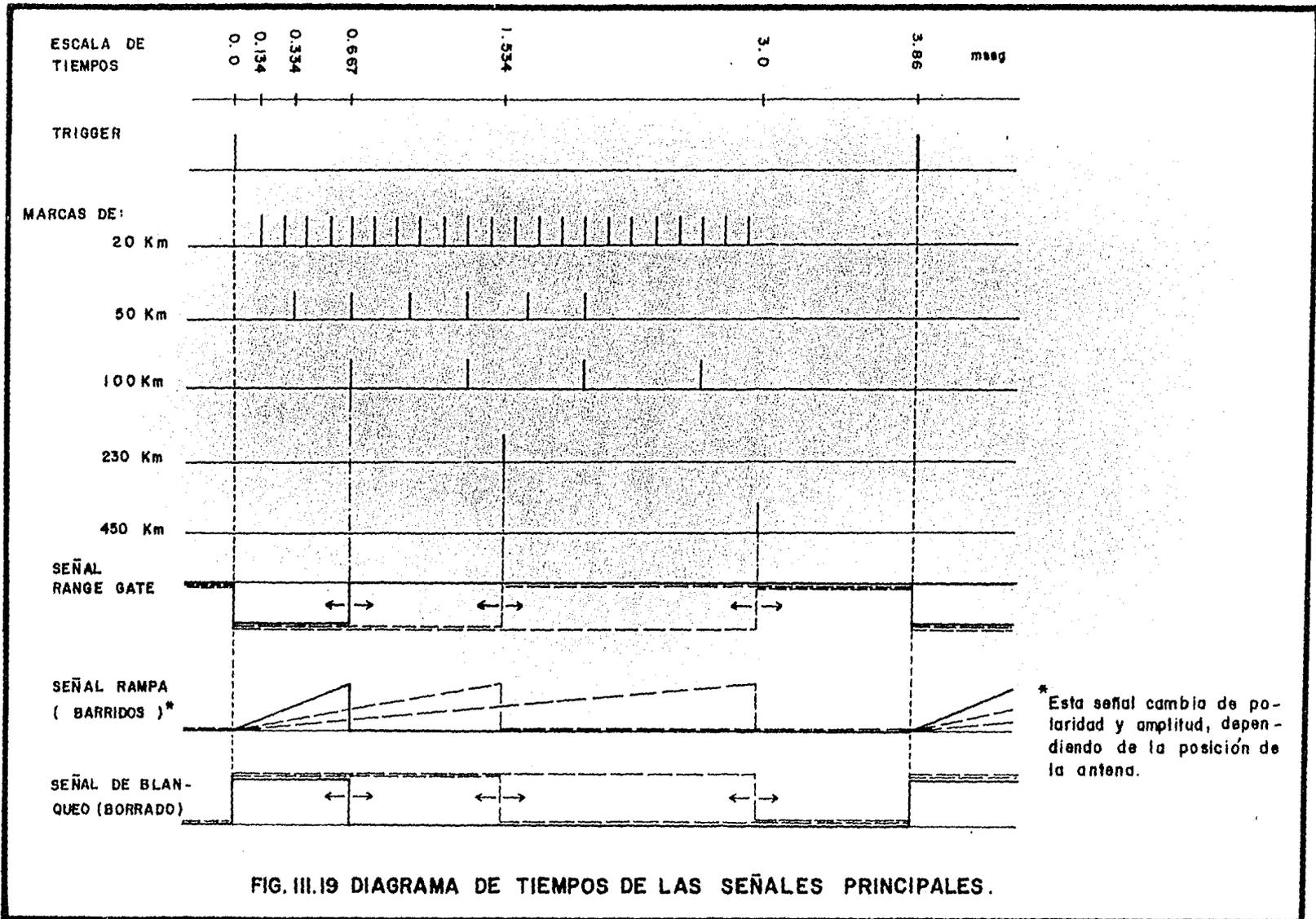


FIG. III.19 DIAGRAMA DE TIEMPOS DE LAS SEÑALES PRINCIPALES.

3. TRANSMISOR - RECEPTOR (UNIDAD 2)

El transmisor es la parte del radar que genera los pulsos de alta potencia, teniendo las siguientes características principales:

- 1) Generar energía de RF mediante un magnetrón que opera a -- una frecuencia sintonizable de 5600 a 5650 MHz.
- 2) La potencia de salida de los pulsos es de 250 KW con duración de 3 useg y una frecuencia de 259 pulsos por seg.
- 3) Utiliza un duplexer para la transmisión y recepción de la señal por la misma antena.
- 4) Utiliza un acoplador bidireccional el cual permite medir - la potencia transmitida y la reflejada.

El receptor recibe los pulsos reflejados por los blancos. Sus características son las siguientes:

- 1) Recibe la señal de 5600-5650 MHz y la convierte en frecuencia intermedia de 30 MHz.
- 2) Utiliza un oscilador local que opera manual o automáticamente.
- 3) Contiene un amplificador de FI cuya banda principal es logaritmica con un rango dinámico de 80 dB.

Tanto el transmisor como el receptor estan situados en la misma cabina (Figura III.20). Las especificaciones técnicas se dan en el Apéndice C.

3.1 DESCRIPCION DEL TRANSMISOR

El diagrama de bloques del transmisor se presenta en la Figura --- III.21 y a ella se hará referencia para la descripción.

ALIMENTACION PRINCIPAL

La alimentación para el transmisor y receptor T-R es controlada -- desde la consola y del mismo T-R.

La cabina del T-R tiene dos interruptores de alimentación: 1) Ali-

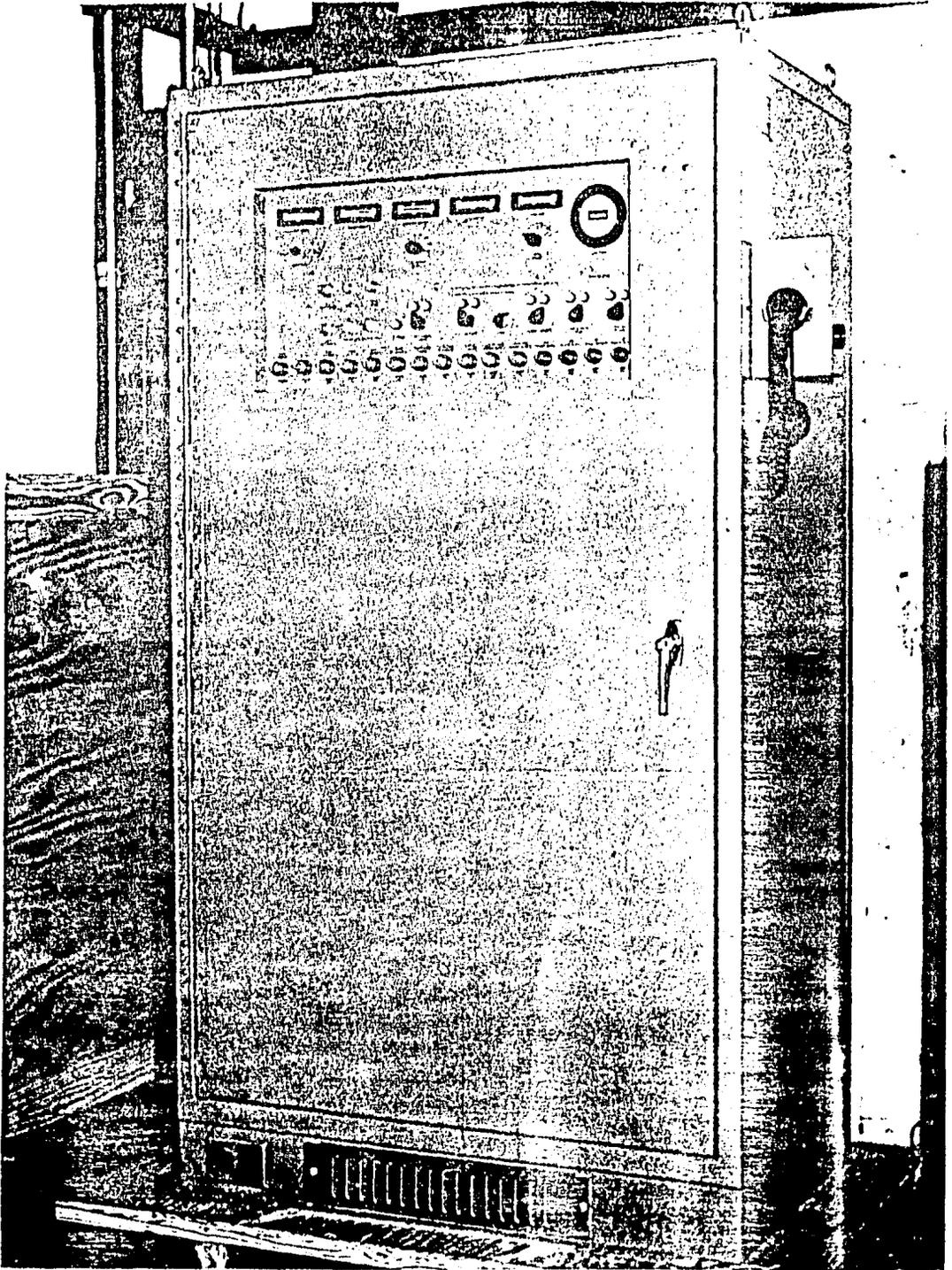


FIGURA III.20 CABINA DEL TRANSMISOR-RECEPTOR

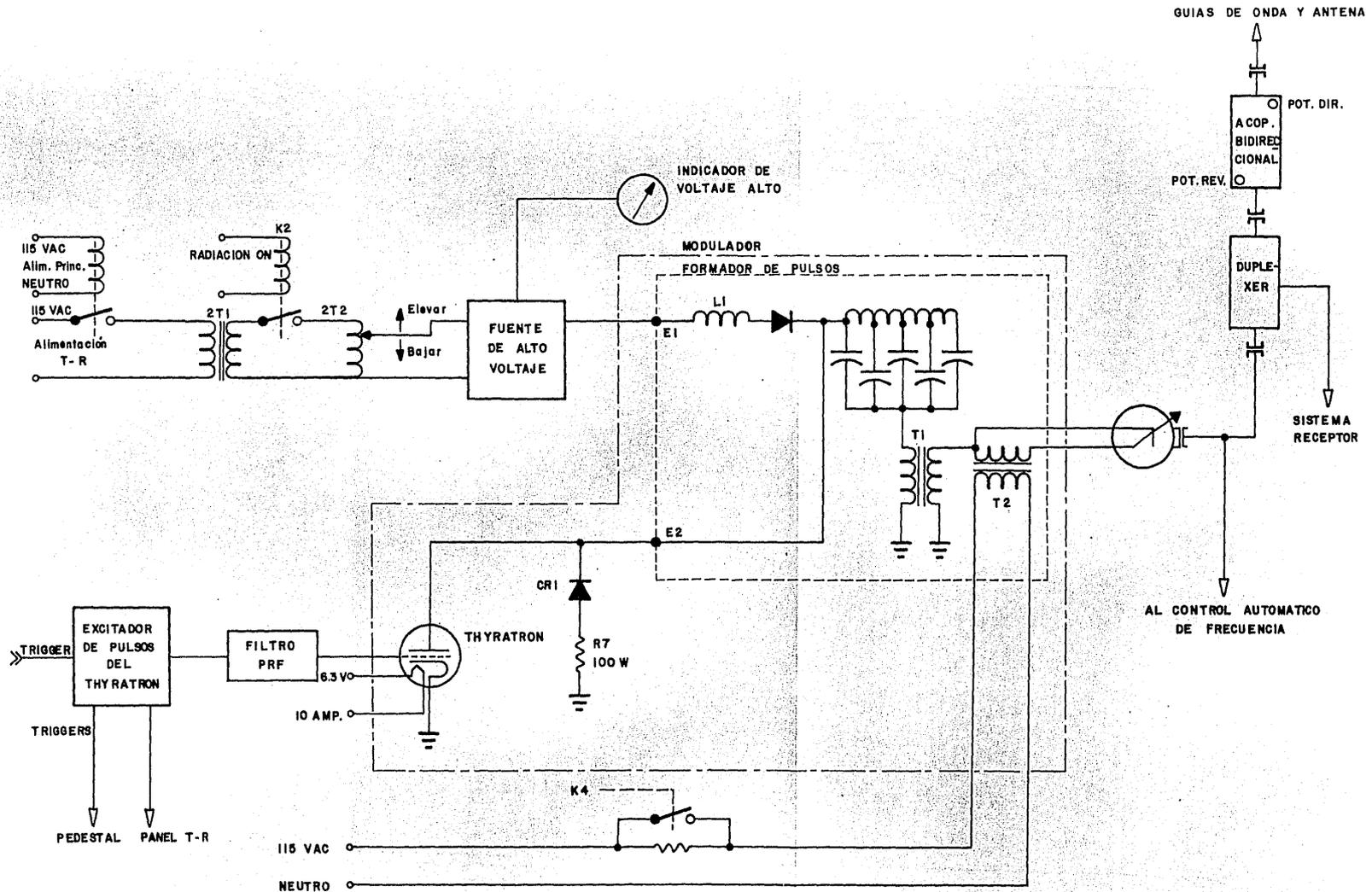


FIG III. 21 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRANSMISOR

mentación principal y 2) Alimentación T-R, los dos deben estar en la posición de encendido para la operación.

Remotamente desde la consola, el T-R puede encenderse siempre y --- cuando el interruptor de alimentación T-R este en la posición de en cendido.

TRANSFORMADOR DE VOLTAJE CONSTANTE

Todos los elementos del T-R funcionan con un voltaje regulado por un transformador de voltaje de línea (2T1). La regulación esta dentro del 1% sin carga y a plena carga dentro del $\pm 10\%$ del rango de voltaje de entrada.

VARIAC DE ALTO VOLTAJE

El variac de alto voltaje 2T2 es un motor excitador capaz de dar -- 1 KVA.

Cuando el relevador 2K2 se cierra desde cualquier interruptor 'Radiación ON', se le aplica al variac un voltaje de 0 a 130 VRMS el cual puede elevarse o reducirse para variar el voltaje de la fuente de alimentación de 0 a 4.5 KVDC.

FUENTE DE ALIMENTACION DE ALTO VOLTAJE

Esta fuente alimenta a la red formadora de pulsos, proporcionando -- en funcionamiento continuo 150 ma a 4.5 KV. Contiene resistencias divisoras de voltaje para el medidor de voltaje con el cual se verifica el nivel de salida de la fuente.

MODULADOR

Refiriendose a la Figura III.21 el modulador está compuesto por -- los elementos que se encuentran dentro de la línea punteada, tales como: una red de carga, un transformador de pulsos, el thyatrón, -- elementos de aislación, etc.

El propósito del modulador o pulsador es proporcionar un voltaje y corriente adecuados para que el elemento generador de la energía de RF opere correctamente.

Algunas de las consideraciones para la selección y diseño de un modulador son las siguientes:

- Longitud del pulso
- PRF
- Voltajes y corrientes de operación
- Protección del tubo (arcos en el magnetrón)
- Tamaño y peso
- Eficiencia

Existen varios tipos de moduladores, teniendo todos una característica en común: Contienen algún medio para almacenar la energía y un interruptor para controlar la descarga de la energía en la carga.

FORMADOR DE PULSOS

El formador de pulsos es una unidad cerrada, sellada y llena de aceite la cual contiene componentes de carga resonantes y un transformador de alto voltaje.

El alto voltaje se aplica al punto E1 y carga los condensadores a través del primario del transformador T1 conectado a tierra. La bobina de carga L1, el diodo de carga y el primario del transformador forman un circuito resonante en donde el tiempo de carga de los condensadores es ligeramente menor a $1/PRF$ ó $1/259$ de segundo. Una vez cargados los condensadores, y al aparecer el siguiente pulso de disparo, el gas del thyratrón queda ionizado, poniendo en corto el punto E2 permitiendo descargar rápidamente la energía almacenada a través del primario T1 y produciendo un pulso de 25 a 28 KV y cerca de 30 amp. ó una potencia pico de 740 KW en el secundario. El retorno de corriente de la red formadora de pulsos polariza negativamente el thyratrón y lo corta. Una terminal del secundario de T1 - esta conectada internamente a un lado del transformador T2 y de ahí va directamente a los filamentos del magnetrón. La Figura III.22 - muestra el diagrama de los tiempos de disparo.

Se utiliza un diodo de corriente inversa y una resistencia de 100 W para cortar las corrientes de retorno del transformador T1, de esta forma se protegen los circuitos del modulador.

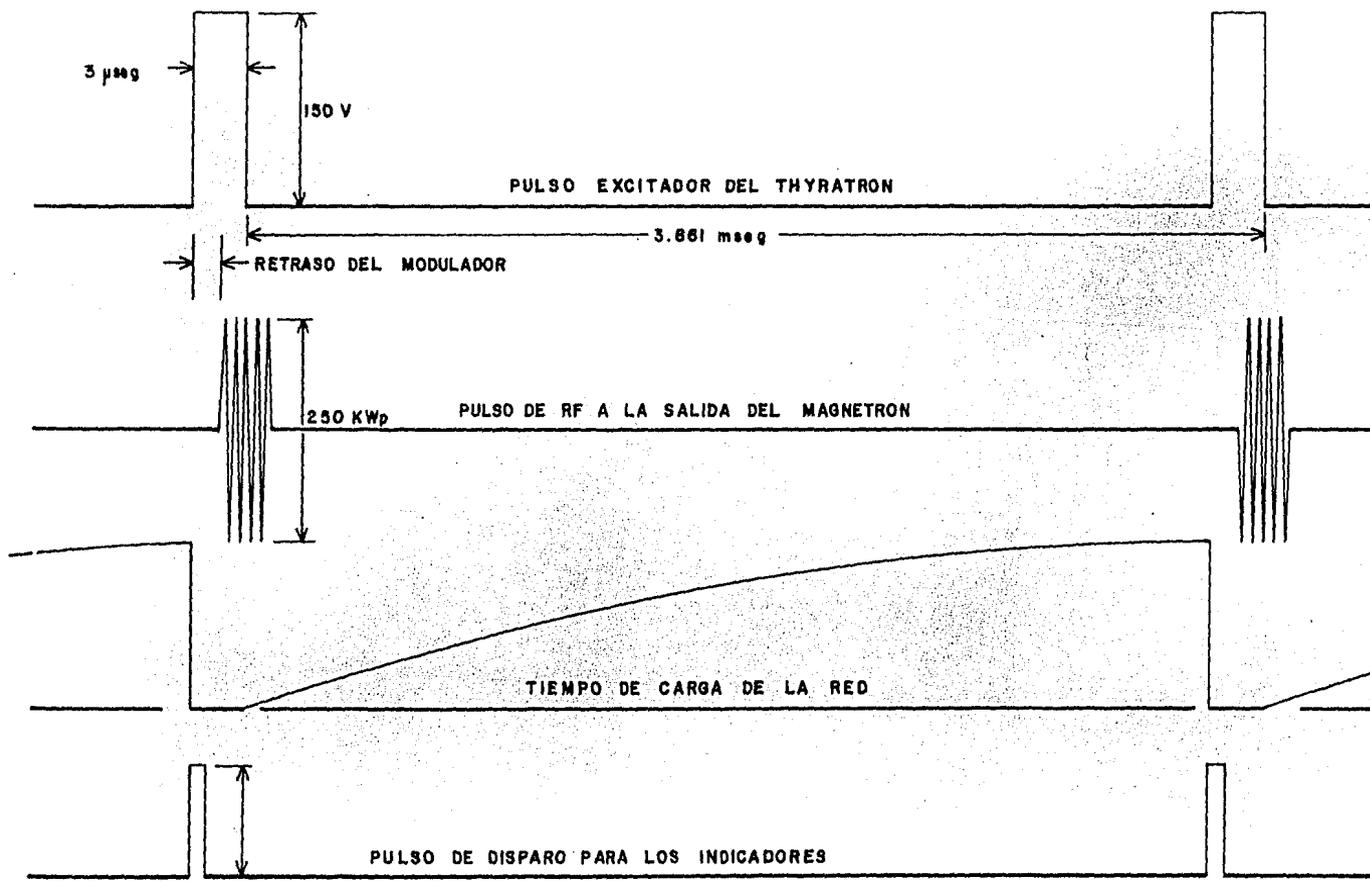


FIG. III. 22. DIAGRAMA DE TIEMPOS DE DISPARO DEL MODULADOR

EXCITADOR DE PULSOS DEL THYRATRON

Este bloque es una unidad blindada la cual amplifica el trigger generado en la consola a un voltaje de 150 a 200 V de amplitud y un ancho del pulso igual al de la entrada.

La amplificación del pulso de disparo se lleva a cabo mediante transformadores de potencia y es conducido a través de un filtro al thyratrón. Esta unidad proporciona además pulsos de trigger auxiliares para varias localizaciones.

FILTRO PRF

El filtro PRF es una unidad cerrada que se utiliza para proteger al excitador de pulsos de los retornos de voltaje producidos por el thyratrón ionizado los cuales ocurren a una frecuencia aproximada de 20 MHz y llegan a alcanzar algunos cientos de volts.

THYRATRON

El thyratrón es una válvula llena de gas conteniendo cuatro electrodos: Un filamento, un cátodo, un ánodo y una rejilla. Generalmente están llenos de hidrógeno para prolongar su vida útil. Su función es similar a la de un interruptor, se dispara (ó cerrado) cuando se le aplica un pulso de 150 V en su rejilla, manejando corrientes pico extremadamente altas; requiere de 6.3 V a 10 amp. en su filamento, el cátodo está conectado al chasis y la placa a un diodo de corriente inversa CR1 y de ahí a una resistencia de caída R7 de 100 W. Cuando el thyratrón está ionizado se produce un corto circuito a tierra del punto E2 del formador de pulsos. La válvula permanece en estado ionizado durante el tiempo de la duración del pulso, o sea, 3 useg.

El diodo se incluye para eliminar los altos voltajes de inversa en el caso de que la carga funcionara mal ya que los altos voltajes en el ánodo podrían dañar permanentemente la válvula.

MAGNETRON

El magnetrón es un oscilador que se caracteriza por su tamaño pequeño, peso ligero, voltajes de operación razonables, buena eficiencia y larga duración.

Tiene la función de convertir la energía extraída de un campo eléctrico constante (potencial) a un campo de RF (Radio-frecuencia).

La estructura básica de un magnetrón consiste de cavidades resonantes idénticas colocadas en un patrón cilíndrico alrededor de un cátodo también cilíndrico como se muestra en la Figura III.23.

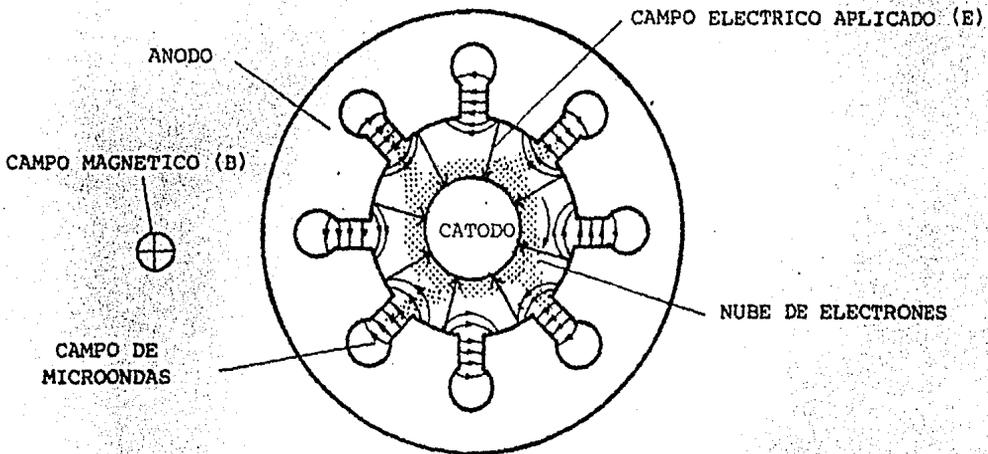


FIGURA III.23 SECCION TRANSVERSAL DE UN MAGNETRON.

Un imán permanente es usado para producir un fuerte campo magnético normal a la sección transversal. El ánodo es mantenido a un alto voltaje positivo con respecto al cátodo. Los electrones emitidos desde el cátodo son acelerados hacia el bloque del ánodo, pero la presencia del campo magnético produce una fuerza en sentido azimutal, la cual causa que la trayectoria de los electrones sea en la misma dirección.

La totalidad de electrones emitidos por el cátodo forman una nube de cargas negativas girando alrededor del eje del cátodo, la cual se extiende hasta una distancia intermedia entre los radios del --

ánodo y cátodo. El movimiento de la nube giratoria de electrones - en el circuito de microondas del ánodo concéntrico induce en dicho circuito una corriente de ruido la cual excita a las cavidades resonantes formando un campo de microondas a la frecuencia de resonancia. La velocidad de los electrones es función del voltaje aplicado y del campo magnético y se hace que estén en sincronía con la velocidad característica del circuito de microondas. Consecuentemente, como la nube de electrones esta girando se concentra en ramas - hacia las cavidades convirtiendo su energía potencial en energía de microondas. El proceso continua hasta que los electrones golpean - el ánodo. La generación de energía de microondas esta limitada por perdidas óhmicas internas.

La potencia de microondas almacenada en las cavidades es acoplada - hacia el exterior a través de una guia de ondas.

Este mecanismo de conversión de energía es altamente eficiente, esto es, los valores obtenidos pueden ser tan altos como del 65 al 75%.

El magnetrón utilizado en el Sistema opera máximo a 320 KW, un PRF de 259, un pulso de 3 useg de ancho y un ciclo de trabajo de 0.00077.

La válvula tiene una eficiencia de aproximadamente 50% operando con una carga resistiva de los componentes de la guia de ondas.

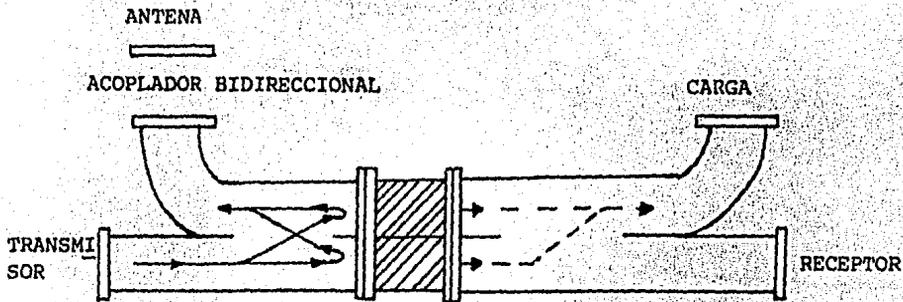
DUPLEXER

El duplexer es del tipo híbrido balanceado, con una relación de acoplamiento de 3 dB y usa válvulas TR (Transmite-Recibe) dobles. Requiere de un voltaje constante de -700 V para ionizar cada elemento. Esta basado en un juntura híbrida de ranuras angostas las cuales -- consisten de dos secciones de guia de ondas unidas a lo largo de -- una de sus paredes angosta con las ranuras a lo largo de la pared - común para proporcionar el acoplamiento en ambas.

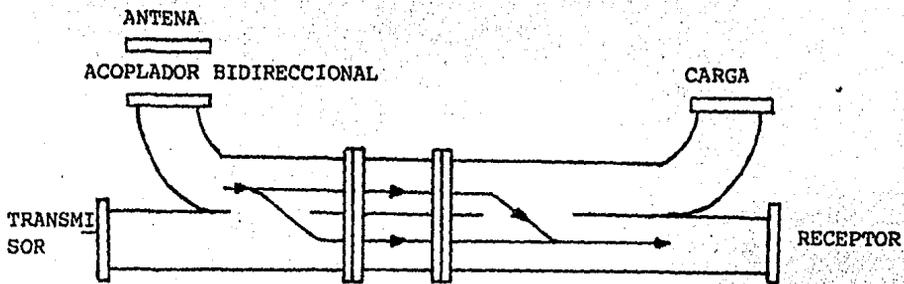
En la condición de transmisión (Figura III.24a) la potencia es dividida igualmente en cada guia de ondas por la primera juntura híbrida. Los dos tubos TR estan ionizados o activados actuando como corto circuito y reflejando la potencia incidente hacia el lado de la antena, según se muestra con líneas sólidas. La energía que lle

ga a pasar a través de los tubos TR (mostrado con líneas punteadas) es dirigida al lado de guía de ondas la cual tiene acoplada una carga.

En la recepción los tubos TR no están activados ó ionizados y las señales del eco pasan a través del duplexer y entran en el receptor como se muestra en la Figura III.24b. La potencia se divide igualmente en la primera ranura y causa un defasamiento de 90° , recombinándose en el brazo del receptor y no en el lado de la carga.



a) CONDICION DE TRANSMISION



b) CONDICION DE RECEPCION

FIGURA III.24 DUPLEXER BALANCEADO USANDO TUBO DOBLE TR Y DOS JUNTURAS HIBRIDAS.

ACOPLADOR BIDIRECCIONAL

La energía de RF del duplexer es transmitida al acoplador bidireccional y de ahí a la antena. Este acoplador tiene dos conectores que se utilizan para medir la potencia transmitida y la reflejada.

El acoplador bidireccional es una juntura de dos guías de ondas de cuatro puertos y acoplados por unas ranuras. La Figura III.25 muestra la ilustración de un acoplador.

El acoplador tiene la propiedad de que una onda incidente en el puerto 1 acopla la potencia en los puertos 2 y 3 pero no en el 4. Similarmemente, la potencia incidente en el puerto 2 la acopla en los puertos 1 y 4 pero no en el 3. Los puertos 1 y 4 y analogamente 2 y 3 son no acoplados.

La operación de un acoplador es medida por dos parámetros: 1) Acoplamiento, 2) Directividad.

Si P_i es la potencia incidente a transmitir y P_f es la potencia acoplada en dirección directa, el acoplo en decibeles esta dado por:

$$C = 10 \log \frac{P_i}{P_f}$$

Para este radar $C \approx 30$ dB.

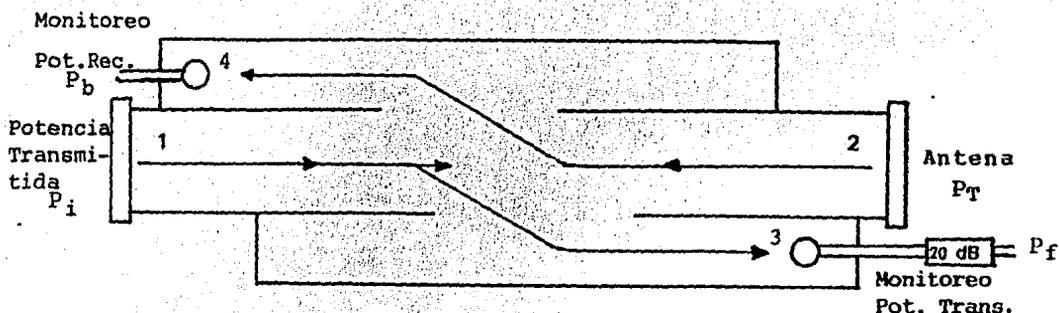


FIGURA III.25 ESQUEMA DEL ACOPLADOR BIDIRECCIONAL

La directividad es una medida de que tan bien la potencia puede ser acoplada en la dirección deseada en la segunda guía de onda; se define como:

$$D = 10 \log \frac{P_f}{P_b}$$

Para este radar $D = 40$ dB o sea, una relación de $P_f = 10000 P_b$.

3.2 DESCRIPCION DEL RECEPTOR

El receptor es parte del Transmisor-Receptor y el diagrama de bloques se muestra en la Figura III.26. Para su descripción se explicará el funcionamiento de cada bloque siguiendo el camino de la señal de RF/FI en cada uno de ellos.

FILTRO PRESELECTOR

La señal de RF del duplexer se aplica directamente al filtro preselector. Este filtro es un elemento de 3 cavidades con tres mecanismos de sintonía cuya función es atenuar la potencia reflejada por el oscilador local (LO) hasta por 50 dB. Las pérdidas que ocasiona este filtro pueden ser de 2 dB ó mas, por lo que puede ser opcional bajo ciertas condiciones.

MEZCLADOR - PREAMPLIFICADOR

El mezclador está compuesto por dos diodos de cristal CR1 y CR2, la salida de ambos diodos se conecta directamente al preamplificador.

La señal de RF es mezclada con la señal del oscilador local para reducir la RF a una señal de 30 MHz de FI (Frecuencia Intermedia).

El mezclador balanceado usa una juntura híbrida ó "T híbrida". La Figura III. 27 muestra un mezclador en el cual las señales del LO y RF son aplicadas a las dos entradas de la 'T'. En uno de los diodos se obtiene la suma de las señales RF y LO y en el otro diodo se obtiene la diferencia de las dos. Los dos diodos tienen las mismas características. La salida de FI se obtiene restando las salidas de

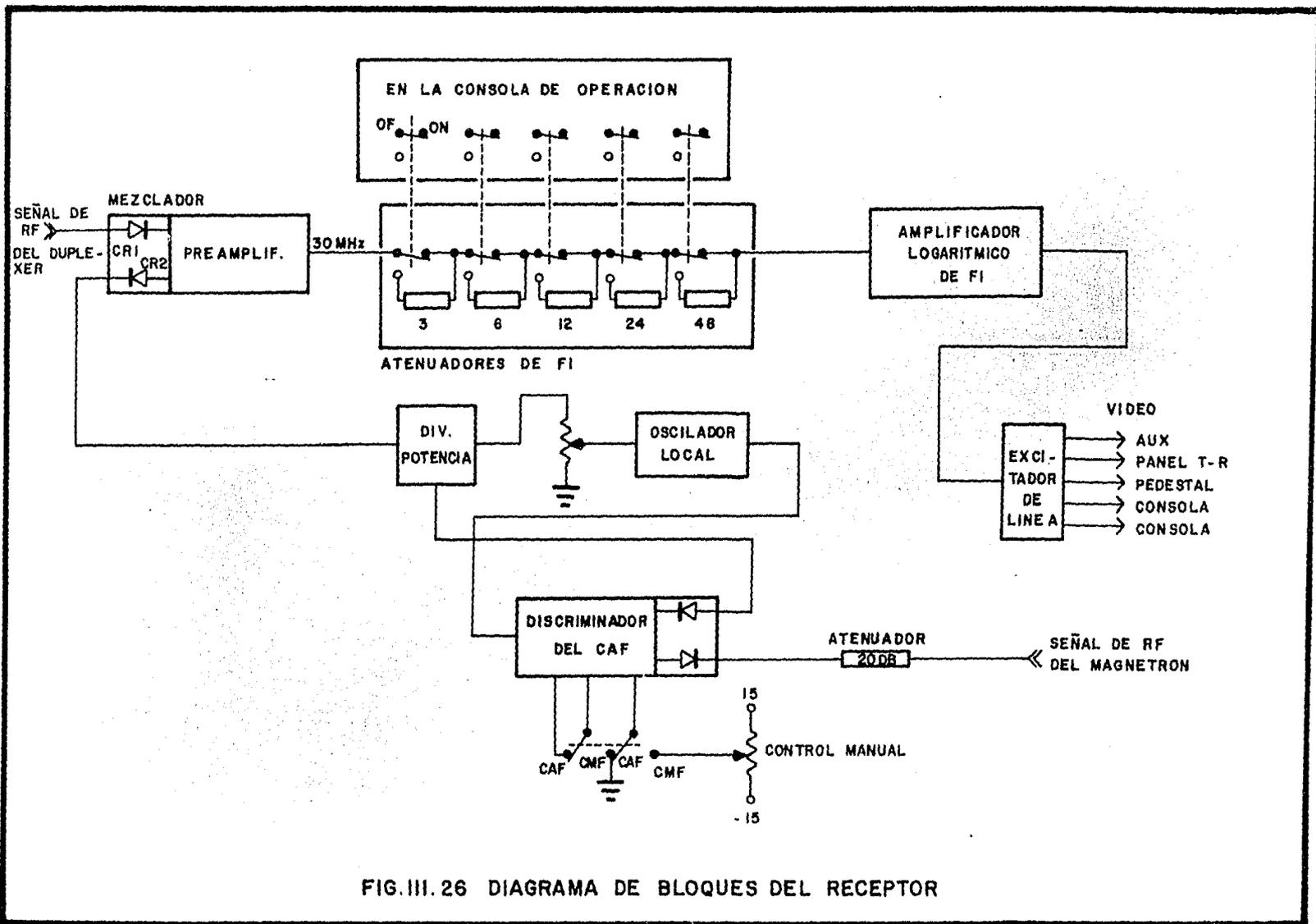


FIG.III.26 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RECEPTOR

los dos diodos mezcladores.

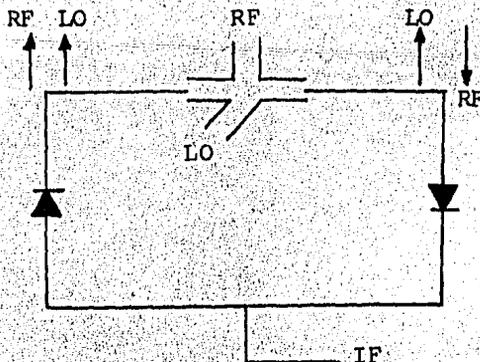


FIGURA III.27 ESQUEMA DEL MEZCLADOR BALANCEADO

El preamplificador de 30 MHz amplifica la señal recibida hasta aproximadamente 25 dB y con el mínimo ruido.

ATENUADORES DE FI

La señal de FI de 30 MHz entra al bloque de los atenuadores de FI. - Estos atenuadores se conectan mediante interruptores situados en el panel de control del T-R en la consola, con valores de 0 a 93 dB en pasos de 3 dB y permiten atenuar la señal en el receptor la suma del valor indicado en cada uno de los interruptores para efectuar mediciones de potencia del eco recibido a través de los indicadores, es decir, el video normal puede ser atenuado el valor fijado en los interruptores y en las pantallas estarán presentes sólo los ecos ó video con una intensidad mayor al valor fijado en dichos atenuadores.

AMPLIFICADOR DE FI

Este bloque amplifica la señal de FI con una ganancia alrededor de - 80 dB y con respuesta logarítmica. Además, lleva a cabo el proceso de detección de la señal, eliminando la FI y produciendo la señal de video que contiene la información sobre los ecos y la cual es distribuida a las pantallas de la consola del sistema y a otros puntos para efectos de monitoreo. El rango dinámico del receptor o amplificador de FI es de 80 dB.

EXCITADOR DE LINEA

Las funciones del excitador de línea son las siguientes:

- Alimenta el video a las líneas coaxiales entre el T-R y la consola mediante amplificadores operacionales de banda ancha, proporcionando una salida diferencial conducida al distribuidor de video en la consola, de tal manera que se cancela la corriente de alterna.
- Alimenta el video a las líneas coaxiales hacia el pedestal y al panel de control del T-R.
- Alimenta la línea del monitor de corriente del magnetrón - que va hacia la consola para ser presentada en el monitor correspondiente.

OSCILADOR LOCAL (LO)

El oscilador local es un elemento de estado sólido, sintonizable y controlado por el voltaje proveniente del Discriminador, funciona a la frecuencia de 30 MHz por arriba o por debajo de la frecuencia del magnetrón, teniendo como límites de operación 5570 y 5680 MHz.

El oscilador produce una señal de RF de aproximadamente 30 mW que es aplicada a un control de ajuste de corriente de los diodos de cristal y a un divisor de potencia que envía la señal a los mezcladores y realimenta al Discriminador de CAF de tal forma que siempre se encuentra 30 MHz mas ó menos de la frecuencia de RF.

DISCRIMINADOR DE CAF (CONTROL AUTOMATICO DE FRECUENCIA)

La función del Discriminador de CAF es transformar la muestra de RF del mezclador CAF en un voltaje de control que es aplicado al oscilador local y lo mantiene en la frecuencia apropiada.

Las entradas al mezclador son la muestra de la señal de RF (≈ 5625 MHz) del magnetrón y la señal de RF (de 5570 a 5680 MHz) del LO; ambas señales son mezcladas para producir una nueva señal de 30 MHz -- \pm el error correspondiente a la mezcla.

Con el CAF (Control automático de frecuencia) el circuito del discriminador determina diferencias a partir de la frecuencia central de 30 MHz para producir un voltaje que ajusta automáticamente la frecuencia del LO.

Con el CMF (Control manual de frecuencia) la diferencia de frecuencia de 30 MHz y la de los mezcladores se ajusta mediante un potenciómetro para que sea cero, observándose la señal de video en un osciloscopio para determinar el punto de ajuste óptimo.

4. ANTENA Y PEDESTAL (UNIDAD 3)

El conjunto de la Antena-Pedestal se muestra en la Figura III.28 - consiste de un reflector, un cuerno alimentador, juntas rotatorias, acoplador direccional, componentes de microondas, anillos deslizantes y mecanismos de excitación de azimut y elevación entre sus principales partes.

El pedestal permite el movimiento de elevación y azimut de la antena mediante motores y engranes de reducción de 612 a 1; los motores son controlados mediante comandos de la Unidad del Servo. También incluye los sincros de posición de la antena, tanto en azimut como en elevación.

5. SERVO (UNIDAD 4)

La cabina de la Unidad Servo se muestra en la Figura III.29 , contiene únicamente servoamplificadores de las señales de error enviadas desde el PPI y RHI para el movimiento en azimut y elevación de la antena. Sin embargo, el servomecanismo que controla la posición angular de la antena incluye componentes de otras unidades y es lo que se describirá en éste punto, incluyendo los servoamplificadores antes mencionados. Las Figuras III.30 y III.31 indican la localización de todos los elementos.

El sistema del servomecanismo consiste de componentes que determinan

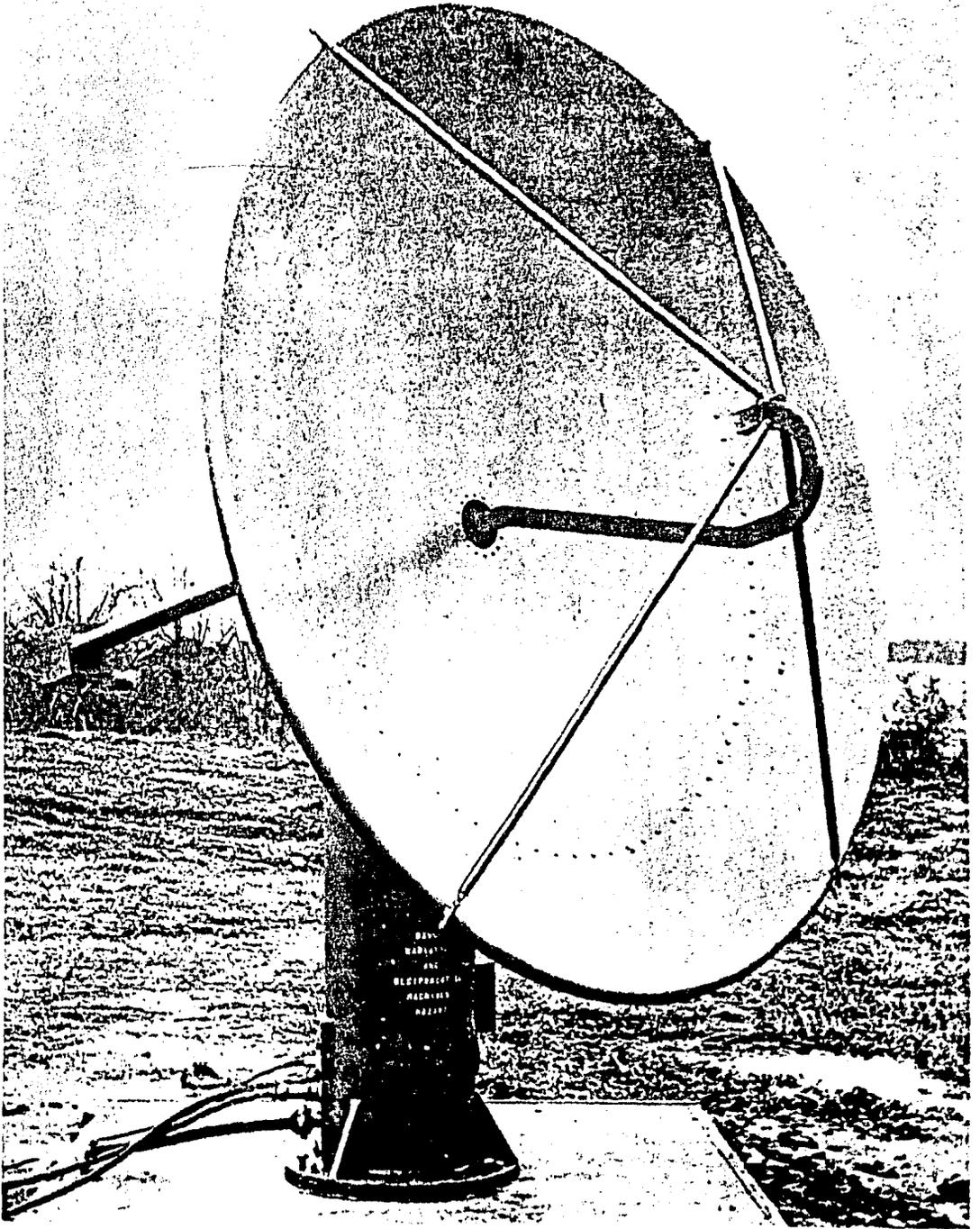


FIGURA III.28 PRESENTACION DE LA ANTENA-PEDESTAL

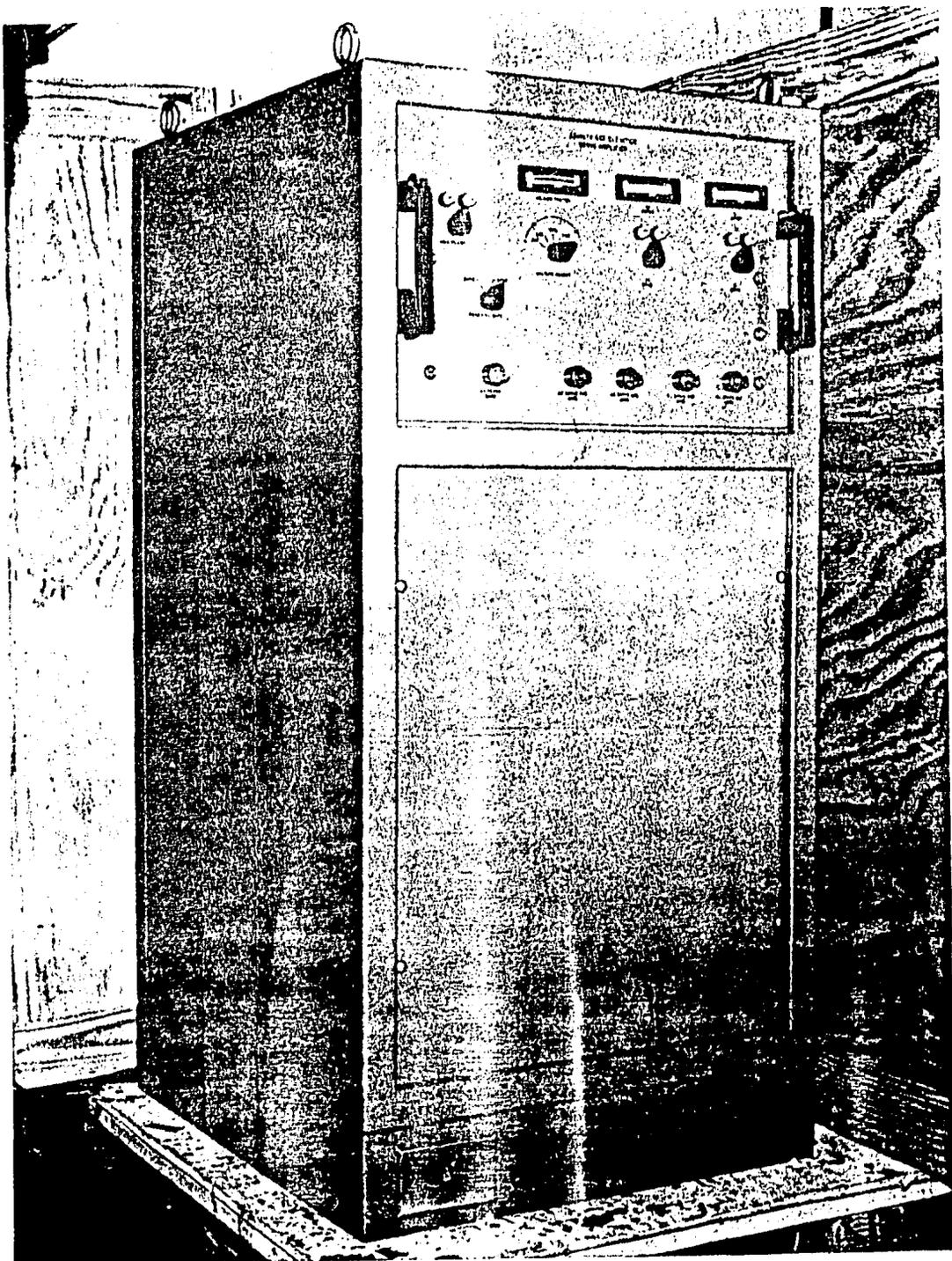


FIGURA III.29 CABINA DE LA UNIDAD DEL SERVO

la posición angular de la antena y los datos que se generan de la posición de la misma.

Esta dividido en dos partes:

- 1.- Subsistema Servo de Azimut
- 2.- Subsistema Servo de Elevación

Cada uno de estos subsistemas contiene servoamplificadores que convierten las entradas de baja potencia de los sincros, en entradas de alta potencia suficiente para excitar los motores de los ejes de azimut y elevación situados en el pedestal para mover la antena. La forma de operación (manual o automática) se selecciona en el PPI para el eje de azimut y en el RHI para el eje de elevación siendo éste último operado únicamente en forma manual.

5.1 SUBSISTEMA SERVO DE AZIMUT

La Figura III.30 muestra el diagrama de bloques de este subsistema - el cual maneja al pedestal en azimut. El funcionamiento se describirá mediante cada uno de los bloques que lo forman.

CONTROLES DEL SERVO

Los controles del servo están contenidos en la unidad PPI de la consola y son prácticamente tres:

- 1.- Sincro
- 2.- Control MAN-AUTO
- 3.- Amplificador-Demodulador

SINCROS

El sincro es un pequeño motor que genera en los embobinados del estator voltajes proporcionales a la posición angular en azimut de la antena y defasados 120 grados cada uno.

El sincro B1 está colocado en la unidad PPI y está conectado a través de un engrane de reducción de 17:1 al volante de posición manual. En el embobinado R1 se genera un voltaje de AC llamado Voltaje de Error cuya amplitud depende de la posición de B1; el embobinado R2 - está directamente conectado a tierra.

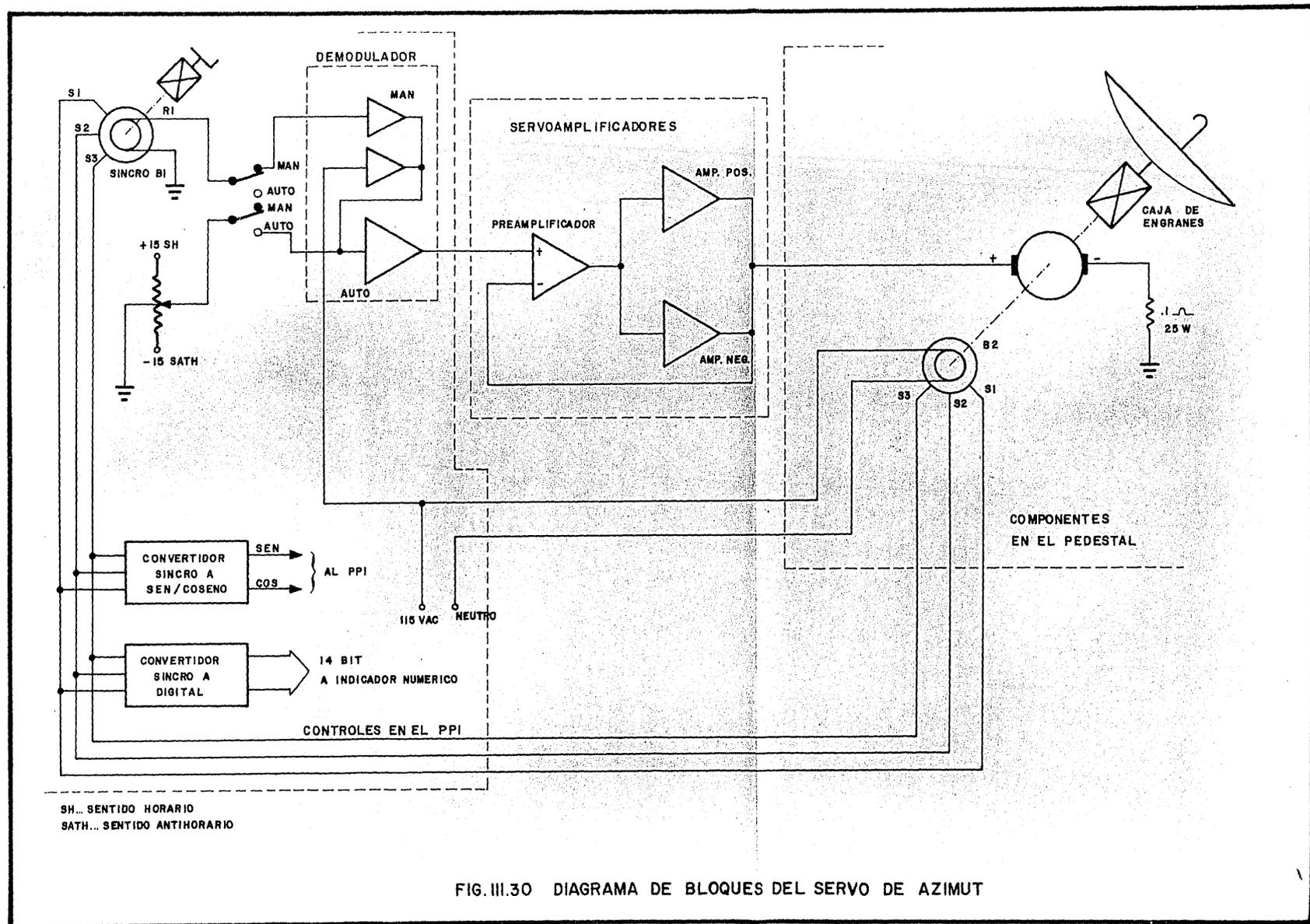


FIG.III.30 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SERVO DE AZIMUT

El sincro B2 está situado en el pedestal. El voltaje de línea de 115 VAC alimenta al rotor, generando en sus salidas un voltaje de AC que es directamente alimentado al estator de B1.

De esta forma, si la posición del rotor de B2 es la misma que B1 el voltaje de error será cero y contrariamente, si la posición de B1 (que es la posición del volante manual) es diferente a la posición de B2 (que es la posición de la antena) se generará un voltaje de error en R1 que depende de dicha diferencia.

Esto sucede en el caso de que la antena este girando automáticamente de 0 a 360 grados continuos. Si se quiere mover la antena manualmente, el volante manual está en una posición fija de 0 a 360 grados. Si la posición de la antena coincide con la posición del volante manual, el voltaje de error será cero, si no coincide se generará un voltaje de error continuo que hará igualar las posiciones. Al mover el volante manual, la antena seguirá el movimiento controlado por el voltaje de error.

CONTROL MAN-AUTO

Un interruptor MAN-AUTO situado en el panel del PPI permite el movimiento de la antena.

La forma manual se lleva a cabo mediante el volante de posición de azimut. En la forma automática se inyecta un voltaje de directa al demodulador que es proporcional a la velocidad de la antena mediante un divisor de voltaje y con alternativas de 3 y 5 RPM en sentido horario y antihorario.

AMPLIFICADOR-DEMODULADOR

La función del demodulador es generar un voltaje de DC proporcional al nivel y fase de entrada en control manual y amplificar el voltaje del divisor de voltaje bajo control automático.

Cuando se mueve la antena manualmente se genera un voltaje de error en R1 que depende de la diferencia de posición de la antena y el volante manual, dicho voltaje se compara en nivel y fase con la señal de referencia de 115 VAC que es el voltaje de alimentación del rotor

de B2. La señal resultante es amplificada y va directamente al servo-amplificador.

Con movimiento automático de la antena el voltaje del divisor va directamente al amplificador y sale del demodulador al servo-preamplificador, quedando la parte de control manual del demodulador desconectada.

SERVOAMPLIFICADORES

Los componentes del servoamplificador están instalados en la cabina del Servo (Unidad 4). Sus partes principales son las siguientes:

- 1.- Preamplificador del Servo.
- 2.- Amplificador de Alta Potencia.

Ambos amplificadores son unidades que contienen canales dobles iguales para manejar las señales excitadoras de azimut y elevación de los demoduladores del PPI y del RHI.

PREAMPLIFICADOR DEL SERVO

El preamplificador tiene dos canales similares de amplificación para las señales de voltaje de control que salen de los demoduladores del PPI y RHI. Utiliza amplificadores operacionales con realimentación para proporcionar mayor amplificación a la señal de entrada de bajo nivel. La salida del preamplificador tiene niveles positivos y negativos y están conectados directamente al amplificador de alta potencia.

AMPLIFICADOR DE ALTA POTENCIA

Esta unidad contiene amplificadores positivos y negativos que proporcionan la alta potencia necesarias para excitar los servomotores.

Los 4 amplificadores (positivos y negativos) manejan los motores de azimut y elevación, están colocados en placas independientes pero contenidos en la misma unidad del servo.

Estos amplificadores utilizan transistores de potencia en un arreglo

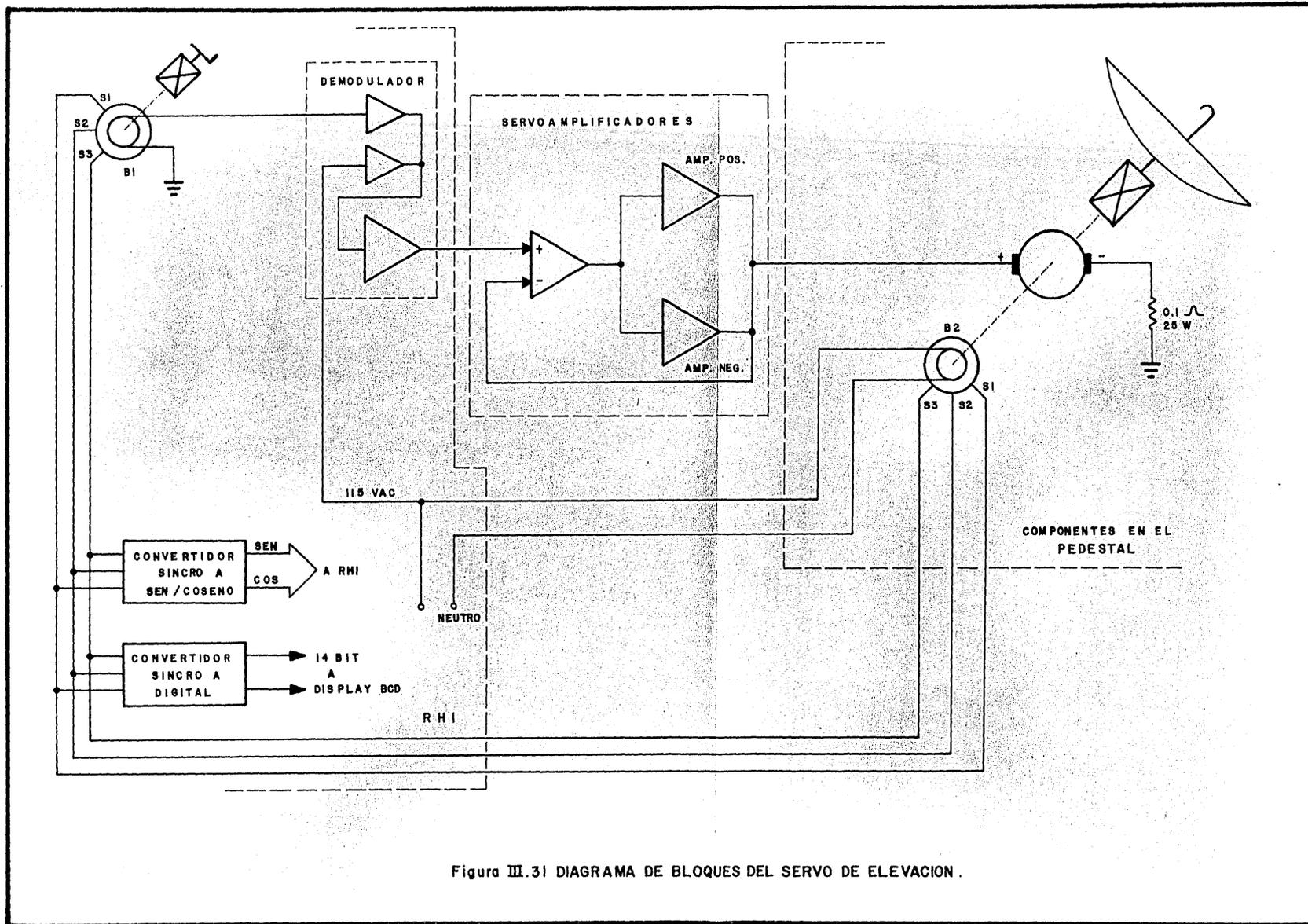


Figura III.31 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SERVO DE ELEVACION.

tal que proporcionan alta ganancia de corriente. Su salida esta conectada directamente al servomotor.

5.2 SUBSISTEMA SERVO DE ELEVACION

La Figura III.31 muestra el diagrama de bloques del subsistema que maneja al pedestal en elevación. El funcionamiento es exactamente igual al Subsistema servo de azimut como se puede observar en la Figura III.30. La única diferencia está en que la elevación de la antena se controla mediante un volante manual y componentes situados en el indicador RHI.

6. UNIDAD FIJA DE PRESURIZACION (UNIDAD 5)

La función de esta unidad es la de mantener la guía de ondas del Transmisor-Receptor al Pedestal sin humedad para que con el tiempo no se dañe por corrosión.

Se utiliza un compresor-deshidratador el cual inyecta aire a la guía de ondas con una presión de aproximadamente 2 lb/ft², no siendo permisible que aumente por ningun motivo a mas de 5 lb/ft².

CAPITULO IV

MEDICION DE LA PRECIPITACION POR MEDIO DE RADAR

1. METODOS DE MEDICION DE PRECIPITACION CON RADAR

Se han desarrollado experimentalmente varios métodos para la medición de la precipitación, utilizando a los radares como instrumento detector, entre otros se encuentran los que se describirán en los párrafos siguientes:

1.1 MEDICION DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACION A PARTIR DE LA REFLECTIVIDAD.

Este método se basa en la correlación entre la intensidad de la señal del eco recibido en el radar y la intensidad de precipitación. Esta correlación es derivada a partir de la ecuación de radar que en su forma simplificada esta dada por:

$$\bar{P}_r = \frac{C/K}{R^2} \cdot Z$$

donde:

C = Constante del Radar

/K/ = Constante de refracción del material que constituye las partículas (para gotas de agua K = 0.93)

R = Distancia de la antena al objeto

Z = Factor de reflectividad.

El factor de reflectividad Z esta relacionado con la intensidad de precipitación por:

$$Z = AI^b$$

donde:

A, b = Constantes que dependen del tipo de lluvia.

I = Intensidad de precipitación.

Los valores de A y b se determinan a partir de comparaciones entre la intensidad del eco y la lluvia registrada en tierra para poder cuantificar la intensidad de la lluvia a partir de la potencia \bar{P}_r medida en el sistema de radar.

1.2 MEDICION DE LA PRECIPITACION POR LA ATENUACION DE LAS ONDAS DE RADIO.

La aplicación de este método consiste en medir la atenuación total producida por la precipitación determinándose un factor de atenuación K que esta asociado con la intensidad de la lluvia por medio de la siguiente relación empírica.

$$K = K_0 I^\gamma$$

en donde:

K_0, γ - son parámetros que dependen de la longitud de onda.

Una variación de este método es el utilizar un radar de doble frecuencia y la relación que asocia la atenuación con la intensidad es la siguiente:

$$\frac{\Delta \log \frac{\bar{P}_r (R_1)}{\bar{P}_r (R_2)}}{k_{0\lambda_1} - k_{0\lambda_2}} = \int_{R_2}^{R_1} I dR$$

en donde el numerador es la diferencia logarítmica entre las potencias recibidas $\bar{P}_r (R_1)$ y $\bar{P}_r (R_2)$, medidas a las distancias R_1 y R_2 y $k_{0\lambda_1}$ y $k_{0\lambda_2}$ son los factores de atenuación para las dos longitudes de onda.

1.3 MEDICION DE PRECIPITACION POR LA VARIACION DE LA REFLECTIVIDAD CON LA LONGITUD DE ONDA.

Este método hace uso de un radar de doble frecuencia para determinar la intensidad por medio de la dependencia en frecuencia de las desviaciones de la dispersión de las ondas de radio a partir de la distribución del tamaño de las gotas.

1.4 MEDICION DE LA PRECIPITACION POR LA TEMPERATURA DE LA RADIAACION DE MICROONDAS.

Este método hace uso de un radiómetro de microondas, en el cual la temperatura medida en el radiómetro es función de la temperatura en el lóbulo principal de la antena y de otros parámetros, esta tempe-

ratura esta relacionada con la intensidad por medio de:

$$\Delta T_1 \approx 0.23 K_0 \bar{T}_{pr} \int_{R_1}^{R_2} I(R) dR$$

en donde ΔT_1 son las variaciones de la temperatura en el lóbulo principal, \bar{T}_{pr} es el coeficiente de absorción de microondas de la precipitación.

1.5 MEDICION DE LA PRECIPITACION POR MEDIO DE RADAR DOPPLER.

A partir del espectro de frecuencias de la señal del eco de precipitación determinado con este tipo de radar, es posible obtener la distribución del tamaño de las gotas y de dicha distribución se calcula la intensidad de la lluvia.

De los métodos brevemente descritos, el primero es el que se describirá más ampliamente en este capítulo. Esta basado en la reflectividad del eco, es el más accesible y el más utilizado actualmente en las mediciones de precipitación tratándose de optimizar las limitaciones que por condiciones de diseño, atmosféricas, etc. no se pueden controlar muy fácilmente.

Los demás métodos que se han mencionado se han realizado con carácter experimental y se han llevado a cabo bajo condiciones óptimas - teniendo aún así limitaciones como de menor área de cobertura, dificultades para tomar en cuenta la atenuación, interferencias, equipo más costoso, etc., por lo tanto su aplicación a sistemas operacionales rutinarios no es posible.

2. DESARROLLO DE LA ECUACION DEL RADAR

El desarrollo de la ecuación del radar permite:

1. Evaluar los parámetros del equipo de radar que influyen en la información presentada en las pantallas.
2. Determinar el significado de la palabra "reflectividad".
3. Determinar las variables que influyen en la reflectividad.

La ecuación del radar relaciona tres factores que determinan el producto final, estos factores son:

- a). Potencia transmitida
- b). Potencia reflejada
- c). Rango o distancia

La antena determina las características de la potencia transmitida, el blanco las de la potencia reflejada y la distancia influye en ambas.

Para el desarrollo de la ecuación de radar se considera un radiador isotrópico (aquel que transmite en todas direcciones uniformemente) de potencia P_t . Esta potencia transmitida se distribuye uniformemente en una esfera cuyo radio es R . La superficie de la esfera esta dada por:

$$S = 4\pi R^2 \quad (4.1)$$

en donde:

S es la superficie y R el Radio de la esfera.

A la potencia transmitida por unidad de área se le llama Densidad de potencia P_o y para la esfera esta dada por:

$$P_o = \frac{P_t}{S} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (4.2)$$

es decir, P_o es potencia por unidad de área en la esfera de radio R .

El radar no es un radiador isotrópico puesto que la antena concentra la potencia transmitida en un haz, es decir, es direccionable (Figura IV.1) y el factor que cuantifica esta capacidad de la antena para concentrar la energía electromagnética se denomina "Ganancia" de la antena, designándosele con la letra G . Se define a la ganancia G como la razón entre el valor de la densidad de potencia máxima y el valor isotrópico a la misma distancia, considerando la misma potencia total transmitida. Por lo tanto, la densidad de potencia emitida por un radiador no isotrópico de ganancia G_t a una distancia R sería:

$$P_o = \frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \quad (4.3)$$

siendo en este caso P_0 la Densidad de potencia máxima a una distancia R producida por una antena no isotrópica o direccional.

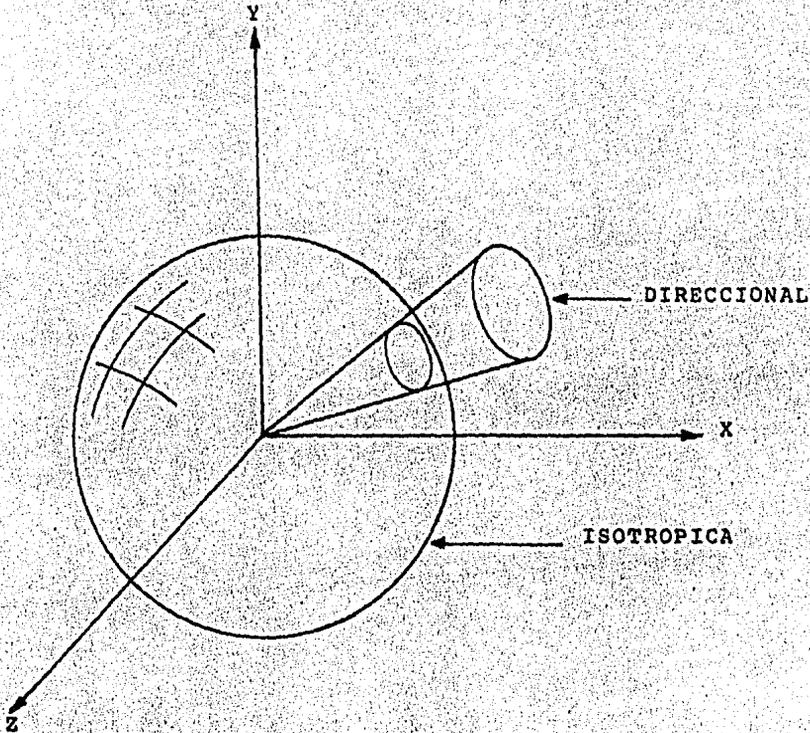


FIGURA IV.1 PATRONES DE RADIACION DE UNA ANTENA ISOTROPICA Y DIRECCIONAL

Una porción de P_0 es interceptada por el blanco u objeto detectado y transmitida o reflejada hacia el radar. La sección transversal de radiación del blanco se le designa como σ , siendo también conocida como coeficiente de dispersión; tiene dimensiones de área y es una medida de la habilidad del blanco para reflejar energía electromagnética hacia la antena receptora del radar.

Por lo tanto, el blanco interceptará una cantidad de potencia P_r dada por:

$$P_r = \frac{P_t G \sigma}{4 \pi R^2} \quad (4.4)$$

El término σ se define también como "el área que intercepta cierta

cantidad de potencia, la cual si es dispersada isotropicamente por el blanco, retornará al receptor una cantidad de energía igual a la que se recibe".

Considerando que el blanco no absorbe energía y que la radiación isotropicamente, entonces la densidad máxima de potencia P_A en la antena del radar, producida por la reflexión isotrópica de un blanco con coeficiente de dispersión esta dada por:

$$P_A = \frac{P_T \sigma}{S} = \frac{P_T G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (4.5)$$

$$P_A = \frac{P_T G \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (4.6)$$

y la potencia interceptada por la antena del radar P_r estará dada por:

$$P_r = P_A \cdot A_e \quad (4.7)$$

$$P_r = \frac{P_T G \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \cdot A_e \quad (4.8)$$

donde A_e es la sección transversal efectiva o el área efectiva de apertura de la antena.

Teóricamente se ha determinado A_e como:

$$A_e = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \quad (4.9)$$

siendo G_R la ganancia de la antena receptora.

Cuando se utiliza la misma antena para transmitir y recibir entonces $G_T = G_R = G$ y la potencia recibida queda:

* El área efectiva de apertura A_e se relaciona con el área física de apertura de la antena (A_p) por medio del factor total de eficiencia de la antena el cual cuantifica las pérdidas producidas por la resistencia ohmica de la antena, por la intercepción del dispositivo de alimentación y por las deficiencias en la iluminación de la antena de tal manera que $A_e = \rho A_p$ en donde $\rho \leq 1.0$

$$Pr = \frac{G^2 P_T \lambda^2 \sigma_i}{64 \pi^3 R^4} \quad (4.10)$$

La ecuación anterior es la ecuación clásica del radar para un solo blanco, caracterizado por su coeficiente de dispersión σ_i .

Para que sea aplicable con fines meteorológicos es necesario calcular σ_i para todos los objetos que son de interés desde el punto de vista meteorológico o sea volúmenes conteniendo gotas de agua, de hielo, copos de nieve, etc.

Ya que el haz del radar incide o "ilumina" una gran cantidad de partículas al mismo tiempo, es necesario considerar la potencia reflejada por cada una de ellas y sumar su efecto individual para obtener el total de la potencia reflejada. Así mismo, se tiene que considerar que las partículas iluminadas están en movimiento continuo y que aproximadamente cada 1/100 de segundo el volumen iluminado es independiente del anterior.

Por lo tanto, si se toma el promedio de la potencia reflejada por un número suficientemente grande de volúmenes iluminados se tendrá que:

$$\bar{Pr} = \frac{G^2 P_T \lambda^2}{64 \pi^3 R^4} \sum_{V_T} \sigma_i \quad (4.11)$$

En la ecuación 4.11 la sumatoria corresponde a la sección transversal de reflexión de todas las partículas dentro del volumen iluminado total.

Es conveniente, en lugar de utilizar $\sum \sigma_i$, calcular la suma de la sección transversal de reflexión de las partículas contenidas en un volumen unitario, típicamente lm^3 , y multiplicar este resultado por el volumen total V_m iluminado por el haz del radar. El volumen V_m dependerá de las características geométricas del haz y para un radar meteorológico típico tendrá la forma de un cono truncado regular - (Figura IV.2):

$$V_m = \frac{\pi l \theta^2 R^2}{4} \quad (4.12)$$

en donde: θ - Es el ancho del haz
 l - La longitud del pulso.

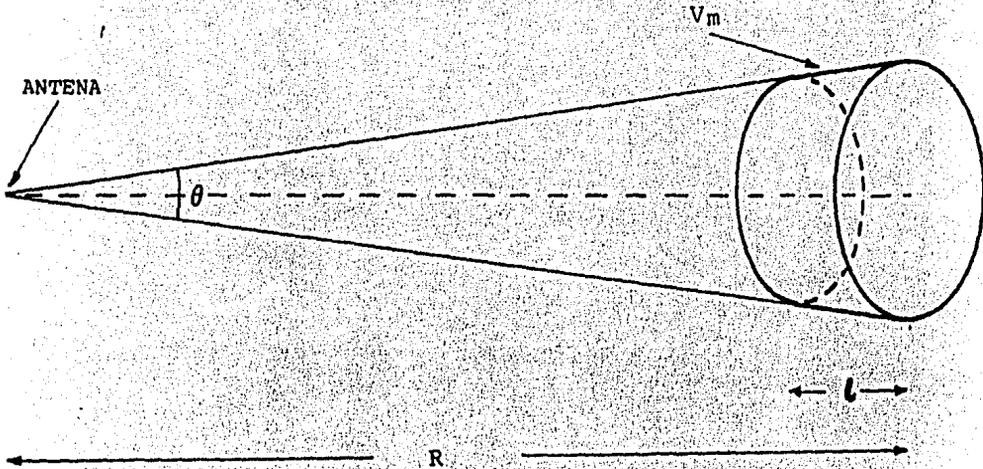


FIGURA IV.2 HAZ DEL RADAR MOSTRANDO EL VOLUMEN V_m .

Por otro lado, al medir P_r en el radar se considera solo la potencia recibida durante períodos de tiempo T , que es el tiempo de duración del pulso, por lo que solo se toma en cuenta la mitad del volumen total del pulso ya que la EEM viaja solo durante un tiempo T en ambos sentidos dentro del volumen del pulso y solo ésta parte influye en la formación de un pulso reflejado de duración T . Por lo tanto, el volumen del pulso que contribuye a P_r es:

$$V_p = \frac{\pi l \theta^2 R^2}{8} \quad (4.13)$$

El volumen V_p multiplicado por la suma de los coeficientes de dispersión individuales de las partículas contenidas en una unidad de volumen (1.0 m^3 típicamente) dará la capacidad total de reflexión de las partículas contenidas en el volumen total sobre el cual incide el pulso transmitido por el radar. La suma de los coeficientes de dispersión de las partículas contenidas en un volumen unitario se expresa generalmente como sigue:

$$\eta = \sum_{V_u} \sigma_i \quad (4.14)$$

conociéndose como "reflectividad" de las partículas a esta suma.

Teniendo en cuenta lo anterior se tiene que:

$$\sum_{V_T} \sigma_i = v_p \eta \quad (4.15)$$

$$\sum_{V_T} \sigma_i = v_p \sum_{V_u} \sigma \quad (4.16)$$

o sea:

$$\sum_{V_T} \sigma_i = \frac{\pi l \theta^2 R^2}{8} \sum_{V_u} \sigma_i \quad (4.17)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (4.11) se obtiene:

$$\bar{P}_r = \frac{G^2 P_T \lambda^2}{64 \pi^3 R^4} \left(\frac{\pi l \theta^2 R^2}{8} \sum_{V_u} \sigma_i \right) \quad (4.18)$$

o sea:

$$\bar{P}_r = \frac{G^2 P_T \theta^2 l \lambda^2}{512 \pi^2 R^2} \sum_{V_u} \sigma_i \quad (4.19)$$

Para obtener la ecuación anterior se ha supuesto que la distribución de la densidad de potencia dentro del volumen iluminado por el pulso es uniforme y que toda la energía transmitida será confinada dentro del mismo volumen. Para compensar los errores producidos por la distribución no uniforme de energía dentro del pulso y por el hecho de que no toda la energía transmitida esta confinada dentro de su volumen, (ya que el ancho del haz (θ) se define como el ángulo sólido subtendido por la línea que une los puntos en donde la densidad de potencia es la mitad de la máxima densidad de potencia dentro del volumen del pulso) se obtuvo, considerando una distribución gaussiana de densidad de potencia, el siguiente factor de corrección:

$$FC = \frac{1}{2 \ln 2} \quad (4.20)$$

Igualmente se hicieron correcciones al cálculo de la ganancia de la antena para compensar por deficiencias en la iluminación de la misma, utilizándose la siguiente expresión para su cálculo.

$$G = \frac{\pi K^2}{\Theta \psi} \quad (4.21)$$

Θ = Angulo de apertura horizontal

ψ = Angulo de apertura vertical.

la cual es aplicable solo para antenas parabólicas circulares.

Introduciendo en la ecuación (4.19) el factor de corrección dado en la ecuación (4.20) y considerando que la ganancia de la antena se calcula con la última relación, se obtiene la siguiente expresión denominada Ecuación de Probert - Jones para el radar meteorológico.

$$Pr = \frac{P_T G^2 \sigma^2 \lambda^2 l}{1024 \pi^2 L n^2 R^2 V_u} \sum \sigma_i \quad (4.22)$$

En la ecuación anterior σ_i cuantifica el comportamiento del iésimo objeto detectado ante la incidencia de energía electromagnética. El cálculo de σ_i para objetos de geometría irregular es extremadamente complicado, por lo que solamente se utilizan aproximaciones empíricas en la mayoría de los casos. Para algunas partículas atmosféricas se ha calculado el valor σ_i partiendo de la fórmula de Mie para esferas. La fórmula de Mie para el coeficiente de dispersión de una esfera afectada por una onda electromagnética plana es:

$$\sigma = \frac{\pi a^2}{\alpha} \left(\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right)^2 \quad (4.23)$$

en donde:

a = radio de la esfera

$$\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda}$$

a_n, b_n = cantidades que se expresan como funciones esféricas de Bessel y de Haenkel de segundo orden con argumentos α y m , siendo m el índice de refracción complejo.

Sin embargo, el cálculo numérico de σ con esta fórmula es extremadamente laborioso por lo que cuando $\lambda \gg D$ ($D =$ diámetro de la partícula) se utiliza la llamada aproximación de "Rayleigh" que establece:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} /K/2 Di^6 \quad (4.24)$$

en donde:

$\lambda =$ longitud de onda de la energía electromagnética.

$Di =$ Diámetro de la i - esima gota.

$K =$ Constante de refracción del material que constituye las partículas (para gotas de agua $/K/2 = 0.93$).

En esta ecuación, σ sólo cuantifica la capacidad de la partícula -- para reflejar o dispersar la onda incidente, sin incluir la cantidad de energía absorbida por el objeto.

De la ecuación (4.24) se observa que a mayor longitud de onda disminuye la sección transversal de reflexión σ_i de las partículas del mismo diámetro y viceversa, cuando se disminuye la longitud de onda, las partículas reflejan mejor la energía electromagnética -- puesto que el valor de σ_i aumenta. Esta ecuación ilustra matemáticamente el hecho de que los radares de longitud de onda pequeña (de 0.5 a 3.0 cm) detectan las áreas cubiertas por nubosidad formada por gotas o partículas muy pequeñas, las cuales no son percibidas por los equipos que transmiten con longitudes de onda mayores (de 5 a 20 cm).

Ya que la precipitación es un conjunto de blancos individuales distribuidos a través de un volumen simultáneamente iluminado por el radar, es común en meteorología de radar usar la reflectividad promedio η , la cual para precipitación, es la sumatoria de las secciones transversales de radar de los blancos en un volumen unitario. La suma de las secciones de las partículas contenidas en un volumen unitario será:

$$\eta = \sum_{V_u} \sigma_i = \sum \frac{\pi^5}{\lambda^4} /K/2 Di^6 \quad (4.25)$$

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} /K/2 \sum N D^6 \quad (4.26)$$

donde la suma de los diámetros a la sexta potencia con el volumen unitario es el factor de reflectividad Z :

$$Z = \sum N D^6 \quad (4.27)$$

Entonces la reflectividad promedio queda:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} /K/2 Z \quad (4.28)$$

Sustituyendo la ecuación (4.28) en (4.22) se obtiene lo siguiente:

$$\bar{P}_r = \frac{P_T G^2 \theta^2 \lambda^2 l}{1024 \pi^2 \ln 2 R^2} \left(\frac{\pi^5}{\lambda^4} /K/2 Z \right) \quad (4.29)$$

simplificando:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3 P_T G^2 \theta^2 l}{1024 \ln 2 \lambda^2} \left(\frac{/K/2 Z}{R^2} \right) \quad (4.30)$$

haciendo que:

$$C_R = \frac{\pi^3 P_T G^2 l \theta^2}{1024 \ln 2 \lambda^2} \quad (4.31)$$

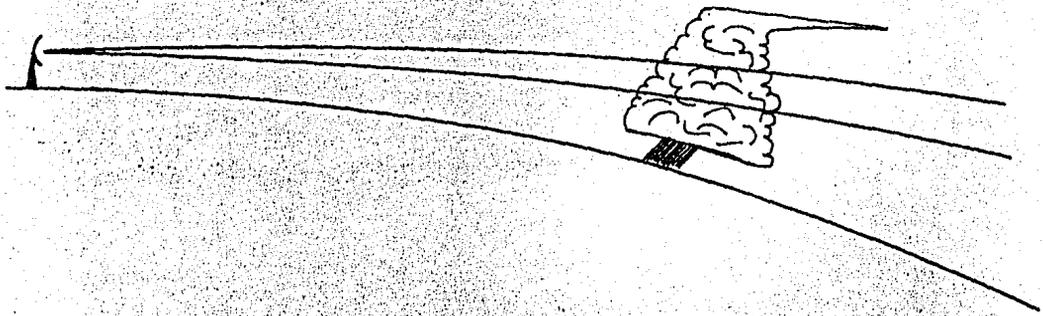
La ecuación (4.30) quedará entonces de la forma siguiente:

$$\bar{P}_r = \frac{C_R /K/2 Z}{R^2} \quad (4.32)$$

en donde C_R = constante de radar.

El valor de C_R depende de las características del equipo de radar utilizado, K depende de las propiedades físicas y químicas de las partículas, Z es el factor de reflectividad anteriormente definido y R es la distancia entre la antena y el objeto.

La ecuación (4.32) es aplicable solamente cuando el blanco interceptado llena completamente el haz del radar (Figura IV.3).



a). CONDICION EN QUE SE APLICA LA ECUACION (4.32).



b). CONDICION EN QUE NO SE APLICA LA ECUACION (4.32).

FIGURA IV.3 INTERCEPCION DEL HAZ CON UN BLANCO. CONDICIONES EN QUE SE APLICA LA ECUACION DEL RADAR.

3. RELACION Z-I

Para calcular la intensidad de precipitación a partir de la ecuación (4.32), es necesario relacionar el factor Z con la intensidad de precipitación I. En la sección anterior se definió Z de la ecuación (4.27) como:

$$Z = \sum ND^6 \quad (4.33)$$

y la relación entre Z e I depende de la forma de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia. Una distribución exponencial inversa para el número N de gotas de lluvia por unidad de tamaño y por unidad de volumen, la cual es una buena aproximación para tamaños medios de gotas está dada por:

$$N = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (4.34)$$

donde N_0 es el número de gotas por unidad de volumen y por unidad de tamaño y Λ es un parámetro con dimensiones l/cm . Entonces, sustituyendo (4.34) en (4.33) y poniendo la relación en forma integral queda:

$$Z = 10^6 \int_0^{\infty} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD \left[\frac{mm^6}{m^3} \right] \quad (4.35)$$

Integrando:

$$Z = 10^6 N_0 \frac{\Gamma(7)}{\Lambda^7} = \frac{720}{\Lambda^7} N_0 \cdot 10^6 \quad (4.36)$$

donde $\Gamma(7) = 6! = 720 *$

Cerca de la superficie terrestre la velocidad vertical del aire es pequeña y la intensidad de precipitación I está dada por:

$$I = \sum_{D=0}^{D_{max}} N_d \cdot M_d \cdot V_d \Delta D \quad (4.37)$$

* $\Gamma(n)$ es la función gamma y se define en el Apéndice B

en donde:

N_d - Es número de gotas cuyo diametro promedio es D .

V_d - Es la velocidad de caída de las gotas.

M_d - La masa de las gotas de lluvia individuales.

Ya que M y V son funciones del diametro, (4.37) es equivalente en forma integral a:

$$I = \int_0^{\infty} (N_0 e^{-\Lambda D}) \left(\frac{\pi \rho}{6} D^3 \right) (130 D^{1/2}) dD \quad (4.38)$$

donde el último término en paréntesis es una medida aproximada de la velocidad de caída de una gota en metros por segundo cuando el diametro de la gota está en metros. La integración de (4.38) da como resultado:

$$I = \frac{130 \pi \rho}{6} N_0 \frac{\Gamma(9/2)}{\Lambda^{9/2}}$$

donde:

$$\Gamma(9/2) = \frac{105}{16} \pi^{1/2} *$$

$$I = \left(\frac{130 \pi \rho}{6} \right) (N_0) \left(\frac{105}{16} \pi^{1/2} \right) \left(\frac{1}{\Lambda^{9/2}} \right) \quad (4.39)$$

Despejando Λ^7 de (4.39)

$$I = 791.75 \frac{N_0}{\Lambda^{9/2}}$$

$$\Lambda^7 = \left(\frac{791.75 N_0}{I} \right)^{14/9} \quad (4.40)$$

Sustituyendo el valor de (4.40) en (4.36)

$$Z = \frac{720 N_0}{\left(\frac{791.75 N_0}{I} \right)^{14/9}} \cdot 10^6$$

Simplificando:

$$Z = 1.6 \times 10^6 \left(\frac{I^{14/9}}{N_0^{5/9}} \right) \quad (4.41)$$

* $\Gamma(n+1/2)$ es la función gamma y se define en el Apéndice B

Donde la unidades de R están en mmhr⁻¹:

(1 grH₂O m²seg⁻¹ = 3.6 mmH₂O hr⁻¹). Cuando No = 10⁷ m⁻⁴, el valor de --- (4.41) finalmente llega a ser:

$$Z = 210 I^{14/9} \left[\text{mm}^6 \text{m}^{-3} \right] \quad (4.42)$$

En donde la relación general tiene la forma:

$$Z = A \cdot I^b$$

El análisis anterior muestra la relación entre el factor de reflectividad Z y la intensidad de lluvia I, y la dependencia de Z con No.

Sin embargo, debido a la variabilidad de los parámetros involucrados en la determinación de Z en (4.42), existen otros métodos mejores para determinar dicha relación, tal como la asociación entre intensidades medidas con pluviógrafos y mediciones de la potencia de los ecos de radar, método que se explicará posteriormente así como sus variaciones; por lo tanto, el desarrollo anterior queda solamente como un apoyo analítico de la relación Z-I obtenida con métodos estadísticos.

Los valores prácticos de A y b se obtienen experimentalmente a partir de un análisis de regresión y dependen del tipo de precipitación y de las partículas dentro de las nubes así como de factores de carácter meteorológico y geográfico.

Se han determinado valores particulares experimentales de A y b que varían desde 70 hasta 500 y de 1 a 2 respectivamente. Entre otras se encuentran las siguientes relaciones:

450 I ^{1.46}	Tormentas
300 I ^{1.37}	Chubascos
205 I ^{1.48}	Lluvia Uniforme

Se ha observado que mediante un período de calibración adecuado y a través de estudios estadísticos y comparativos entre los datos obtenidos del radar y los obtenidos en tierra se pueden calcular los valores de A y b de manera que la relación Z-I se ajuste adecuadamente a determinadas condiciones meteorológicas de la zona. Con la re

lación Z-I así obtenida se calibra electrónicamente el radar de manera que la información obtenida en su área de influencia sea mucho mas exacta y oportuna que la de una red pluviométrica en la misma zona.

De las multiples relaciones Z-I la mas utilizada es la llamada relación de Marshall-Palmer dada por:

$$Z = 200 I^{1.6}$$

Esta relación se aplica a una gran cantidad de tipos de lluvia y -- proporciona resultados satisfactorios cuando se usa en la cuantificación de lluvia producida por nubes estratiformes.

Para lluvias de carácter orográfico se ha utilizado con éxito la siguiente ecuación:

$$Z = 31 I^{1.71}$$

mientras que para lluvias producidas por nubes cumuliformes se utiliza:

$$Z = 486 I^{1.37}$$

La Figura IV.4 muestra estas tres últimas relaciones.

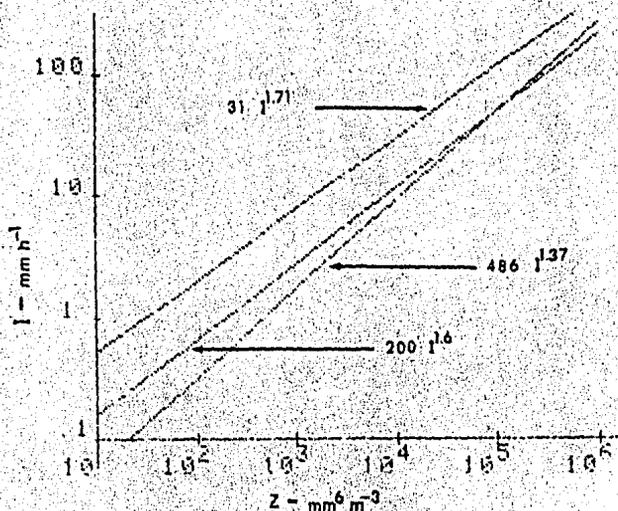


FIGURA IV.4 GRAFICA DE LAS RELACIONES Z-I. LA MAS GENERALIZADA ES $Z = 200 I^{1.6}$

4. VARIACIONES DE LA ECUACION DEL RADAR

La ecuación del radar desarrollada en el punto 2. de éste capítulo es la más generalizada y utilizada para la mayoría de las aplicaciones del radar a la meteorología. Sin embargo, se han desarrollado otras, las cuales consideran factores con los que se podría tener una estimación mas aproximada de la potencia recibida. Algunas de las ecuaciones que se describirán posteriormente podrían sustituirse por la ecuación que se utiliza actualmente (4.32) usando equipo mas o menos accesible para las mediciones, pero otras son casi imposible de usarlas por lo sofisticado del equipo que se necesitaría para su aplicación.

4.1 ECUACION DEL RADAR TOMANDO EN CUENTA LA ATENUACION

La energía electromagnética transmitida por el radar sufre atenuación a lo largo de su trayectoria entre la antena y el blanco debido a los gases atmosféricos, principalmente el oxígeno y vapor de agua, las nubes y lluvia; y es debido a los fenomenos de absorción y dispersión. Dependiendo de la longitud de onda la atenuación puede ser muy importante o en otros casos despreciable en las mediciones de la intensidad de la señal recibida en el radar.

Matematicamente la atenuación de una onda electromagnética a lo largo de su trayectoria se define mediante la siguiente relación:

$$d\bar{P}_r = 2 \cdot K_L \bar{P}_r dr$$

donde:

$d\bar{P}_r$ - Es la reducción de la potencia reflejada \bar{P}_r causada por la absorción y dispersión del medio.

K_L - Es el coeficiente de atenuación.

\bar{P}_r - Es la potencia dispersada.

r - Es la distancia.

Integrando de 0 a r la ecuación anterior, se obtiene:

$$\bar{P}_r = \bar{P}_{r0} e^{-2 \int K_L dr} \quad (4.43)$$

Siendo \bar{P}_{r0} la potencia que se recibiría en el radar en ausencia de atenuación. Expresando la atenuación en decibeles, la ecuación (4.43) quedaría:

$$10 \log \frac{\bar{P}_r}{\bar{P}_{r0}} = -20 \int_0^r K dr \cdot (\log e) \quad (4.44)$$

o bien:

$$\bar{P}_r = \bar{P}_{r0} 10^{-0.2 \int_0^r K dr} \quad (4.45)$$

en donde :

$$K = 10 (\log e) K_L$$

y se expresa en decibeles por unidad de longitud.

Ya que la atenuación de la energía puede ser causada por gases, nubes o precipitación, el coeficiente de atenuación K se expresa como sigue:

$$K = k_g + k_n + k_p$$

siendo:

k_g - Coeficiente de atenuación por gases.

k_n - Coeficiente de atenuación por nubes.

k_p - Coeficiente de atenuación por precipitación.

La atenuación de microondas por gases atmosféricos k_g es mínima tratándose de ondas cuya longitud sea mayor a 3 cm por lo cual generalmente no se toma en cuenta. Sin embargo, a longitudes de onda de 1 cm el efecto de la atenuación es considerable.

Los gases atmosféricos que producen la atenuación son el oxígeno y el vapor de agua. La Figura IV.5 es un diagrama que muestra la dependencia de la atenuación con la longitud de onda para el oxígeno y el vapor de agua.

Se puede observar que a una longitud de onda de 5.0 cm la atenuación es aproximadamente 0.008 dB/Km y la atenuación total para blan

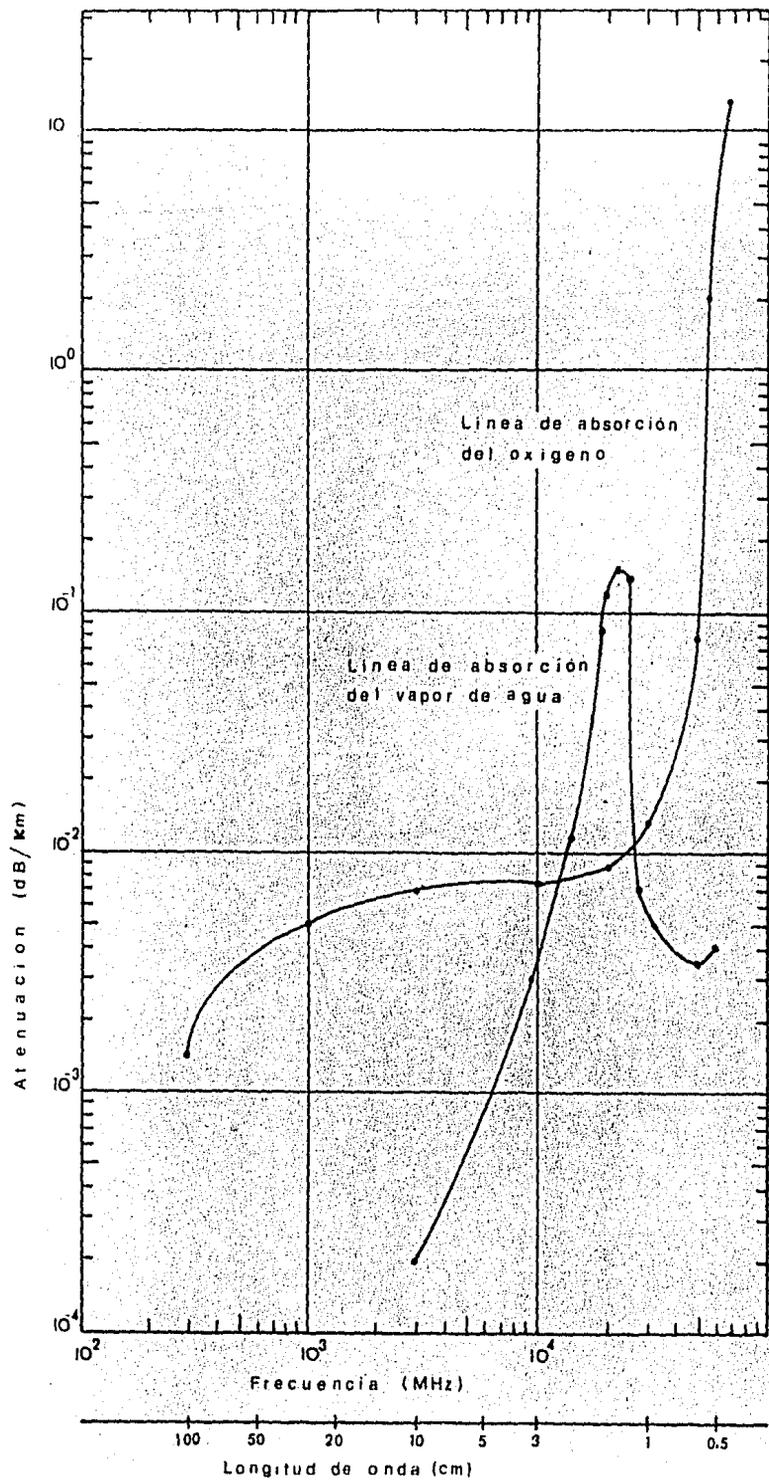


FIG.IV.5 DEPENDENCIA DE LA ATENUACION CON LA LONGITUD DE ONDA PARA EL OXIGENO Y VAPOR DE AGUA

cos que se encuentran a 62 Km será de apenas 1.0 dB.

La atenuación k_n producida por gotas de nubes puede expresarse de la siguiente forma:

$$k_n = K_1 \cdot M$$

en donde:

k_n - Coeficiente de atenuación por nubes en dB/Km

K_1 - Factor de atenuación en dB/Km/gr/m³

M - Contenido de agua líquida de la nube en gr/m³

definiendose K_1 como:

$$K_1 = 0.4343 \frac{6\pi}{\rho \lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{-m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$$

$$K_1 = 0.4343 \frac{6\pi}{\rho \lambda} \operatorname{Im} (-K)$$

y

$$M = \frac{4\pi\rho}{3} \sum_{i=1}^N a^3$$

en donde:

ρ - Densidad del agua (lgr/cm³)

$\operatorname{Im}(-K)$ - Parte imaginaria del índice de refracción complejo dado en la Tabla IV.1.

a - Radio de las gotas.

TABLA IV.1

$\operatorname{Im}(-K)$ EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y LONGITUD DE ONDA

CANTIDAD	TEMPERATURA °C	LONGITUD DE ONDA			
		10	3.21	1.24	.62
$\operatorname{Im}(-K)$	20	0.00474	0.01883	0.0471	0.0915
	10	0.00688	0.0247	0.0615	0.1142
	0	0.01102	0.0335	0.0807	0.1441

Se han calculado valores de K_1 para diferentes longitudes de onda - dados en la Tabla IV.2. En esta tabla se observa una disminución - en la atenuación al aumentar la longitud de onda.

TABLA IV.2
FACTOR DE ATENUACION K_1 (dB/Km/gr/m³)

TEMPERATURA		LONGITUD DE ONDA			
		0.9	1.24	1.8	3.2
°C					
NUBE (DE AGUA)	20	0.647	0.311	0.128	0.0483
	10	0.681	0.406	0.179	0.0630
	0	0.99	0.532	0.267	0.0858
NUBE (DE HIELO)	0	8.74×10^{-3}	6.35×10^{-3}	4.36×10^{-3}	2.46×10^{-3}
	-10	2.91×10^{-3}	2.11×10^{-3}	1.46×10^{-3}	8.19×10^{-3}
	-20	2.0×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.0×10^{-3}	5.63×10^{-3}

Para determinar el coeficiente de atenuación por precipitación k_p - se parte de la relación de la intensidad de lluvia en un punto; se expresa como:

$$I = \frac{4}{3} \pi \rho \int_{a=0}^{\infty} N_a a^3 (w_a - w_u) da$$

En donde:

w_a - Velocidad terminal de las gotas.

w_u - Velocidad de las corrientes ascetes.

N_a - Número de gotas en un volumen unitario cuyo radio esta entre a y $a+da$.

La ecuación que relaciona el coeficiente de atenuación k_p con la intensidad es la siguiente:

$$k_p = k_2 I^\gamma \quad (4.46)$$

en donde k_2 y γ son parámetros que dependen de la longitud de onda. Si se hace:

$$K' = k_2 I^{\gamma-1}$$

la ecuación (4.46) puede escribirse como:

$$k_p = K' I$$

Habiéndose definido los coeficientes de atenuación y regresando a - a la ecuación (4.44) y (4.45), las cuales se pueden reescribir como:

$$10 \log \frac{\bar{P}_r}{P_{ro}} = -2 \int_0^r (k_g + k_n + k_p) dr$$

ó bien:

$$\bar{P}_r = \bar{P}_{ro} 10^{-0.2 \int_0^r (k_g + k_n + k_p) dr}$$

Según la ecuación (2.32) :

$$\bar{P}_{ro} = \frac{C_R / K^2}{R^2} \cdot Z$$

Por lo tanto considerando la atenuación:

$$\bar{P}_r = \frac{C_R / K^2}{R^2} \cdot Z \cdot 10^{-0.2 \int_0^r k dr}$$

o bien:

$$\bar{P}_r = \frac{C_R / K^2}{R^2 10^{0.2 \int_0^r k dr}} \cdot Z \quad (4.47)$$

La ecuación (4.47) es la ecuación del radar considerando la atenuación que la energía sufre por absorción de los gases atmosféricos, por su paso a través de las nubes y lluvia.

4.2 ECUACION DEL RADAR PARA LA DETECCION DE BLANCOS COMPLEJOS

A continuación se presenta un desarrollo simplificado de la ecuación del radar meteorológico tomando en cuenta el campo electromagnético reflejado por las partículas dentro del volumen dispersor, haciendo mención de algunos componentes que la afectan. El resultado obtenido es equivalente al presentado en la sección IV.2, utilizándose en la práctica la ecuación que pueda ser evaluada con relativa facilidad dependiendo de las herramientas de cálculo con que se cuente.

La detección de la precipitación con radar es posible debido a la dispersión de las ondas de radio por las partículas de precipitación. La señal del eco en cualquier instante de tiempo, resulta de la acción combinada de un conjunto de partículas de precipitación cuyas señales reflejadas llegan simultáneamente a la entrada del receptor del radar.

En la detección de la precipitación la dispersión de cada gota es independiente de la presencia de otras gotas cercanas y no existe dispersión múltiple. Bajo estas condiciones, la potencia media de la señal reflejada puede estar dada en la forma:

$$\bar{P}_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \exp(i 2\vec{k}(\vec{R}_i - \vec{R}_j)) \quad (4.48)$$

donde a_{i-j} es la amplitud del campo dispersor por la $i-j$ 'ésima' partícula, \vec{k} es el vector de la onda incidente de radiación y \vec{R}_i , \vec{R}_j es el vector radial de la $i-j$ 'ésima' partícula.

A las distancias involucradas en la detección y medición de la lluvia, el objeto dispersor generalmente se localiza en la región lejana del campo electromagnético emitido (Región de Fraunhofer), de tal manera que el símbolo de los vectores se puede omitir en las ecuaciones anteriores. Además, el volumen del eco puede ser dividido en placas esféricas de espesor mucho más pequeño de λ y la ecuación (4.48) puede ser escrita como sigue:

$$\bar{P}_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^m \sum_{l=1}^m \left(\sum_{i=1}^{S_h} a_i \right) \left(\sum_{j=1}^{S_l} a_j \right) \exp(i 2k(R_h - R_l)) \quad (4.49)$$

donde las sumatorias para $i-j$ se llevan a cabo dentro de cada capa separadamente.

Ya que el número de gotas dentro de cada placa esférica es grande, las sumas de la ecuación (4.49) pueden remplazarse por integraciones con lo que se introduce la siguiente notación:

$$A(R) = R h(R) \iiint a \cdot n(a) da \cdot f(\theta, \phi) \cdot \text{sen} \theta d\theta d\phi$$

$$A^2(R) = R^2 h^2(R) \iiint a^2 \cdot n(a) da \cdot f^2(\theta, \phi) \text{sen} \theta d\theta d\phi \quad (4.50)$$

en donde $A(R)$ es la amplitud de la señal reflejada por la placa esférica localizada a una distancia R del radar; $n(a)$ es la distribución por amplitud de las partículas; ' a ' es la amplitud de la señal reflejada por una partícula situada en el centro del volumen del eco del radar; $f(\theta, \phi)$ es el patrón de radiación de la antena; $h(R)$ es la distribución radial de la amplitud del campo incidente dentro del volumen del pulso de radar; θ y ϕ son los ángulos en coordenadas esféricas con el radar como origen.

La amplitud $A(R)$ es una variable aleatoria, la cual puede representarse como:

$$A(R) = \bar{A}(R) + \Delta A(R)$$

en donde $\bar{A}(R)$ es el valor medio de $A(R)$ en la placa con coordenada R y $\Delta A(R)$ es la desviación de $A(R)$ con respecto a la media.

La expresión (4.49) para \bar{P}_r puede desglosarse de la siguiente forma:

$$\bar{P}_r = \bar{P}_{r1} + \bar{P}_{r2} + \bar{P}_{r3}$$

siendo:

$$\bar{P}_{r1} = \frac{1}{2} \int A^2(R) dR$$

$$\bar{P}_{r2} = \frac{1}{2} \left| \int \bar{A}(R) \exp(i2kR) dR \right|^2$$

$$\bar{P}_{r3} = \frac{1}{2} \iint \Delta A(R_1) \Delta A(R_2) \exp(i2k(R_1 - R_2)) dR_1 dR_2$$

La potencia media de la señal del eco de precipitación esta dada por tres términos:

\bar{P}_{r1} - Representa la contribución del dispersor no coherente.

\bar{P}_{r2} - Representa la componente coherente.

\bar{P}_{r3} - Representa las variaciones de la densidad de partículas y de su composición en el espacio dispersor.

Describiendo el pulso de radar como una función de Gauss, se han determinado las relaciones de $\bar{P}_{r2}/\bar{P}_{r1}$ y $\bar{P}_{r3}/\bar{P}_{r1}$ dando como resultado:

$$\frac{\bar{P}_{r2}}{\bar{P}_{r1}} \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2 \ln 2} N_0 e^{-\frac{4\pi^2 h^2}{\ln^2 \lambda^2}}$$

donde:

N_0 - Es el número de partículas en el volumen dispersor.

h - Longitud del pulso.

Tomando en cuenta ciertos valores típicos se ha obtenido:

$$\frac{\bar{P}_{r2}}{\bar{P}_{r1}} \approx 10^{-1} \quad (\lambda = 3.0 \text{ cm}, h=30\text{m})$$

$$\frac{\bar{P}_{r2}}{\bar{P}_{r1}} \approx 10^{-2} \quad (\lambda = 10.0 \text{ cm}, h=30\text{m})$$

resultando que la contribución neta del dispersor coherente en la señal reflejada es muy pequeña.

La relación entre $\bar{P}_{r3}/\bar{P}_{r1}$ representa una evaluación aproximada:

$$\frac{\bar{P}_{r3}}{\bar{P}_{r1}} \approx \frac{R_0 \Delta \bar{N}^2}{N \left(1 + \left(\frac{4\pi R_0}{\lambda} \right)^2 \right)}$$

donde:

N - Número de gotas en la sección transversal de dispersión.

Ro - Radio de correlación entre las capas definidas por R_1 y R_2

Utilizando valores típicos se obtiene que:

$$\frac{\bar{P}_{r3}}{\bar{P}_{r1}} \approx 10^{-4} \quad (\lambda = 3.0 \text{ cm}, R_o = 1 \text{ Km}, N \sim 10^4)$$

resultando que la contribución neta por las fluctuaciones en la densidad de las partículas es muy pequeña como en el caso de la componente coherente del dispersor.

Despreciando entonces los términos P_{r2} y P_{r3} se obtiene:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \int A^2(R) dR \quad (4.51)$$

Se ha demostrado que la amplitud del campo reflejado por una sola partícula esta dada por:

$$a = \sqrt{2} \left(\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma \chi}{(4\pi)^3 R^4} \right)^{1/2} \quad (4.52)$$

donde P_T es la potencia del pulso; G es la ganancia de radiación, λ es la longitud de onda; σ es la sección transversal de dispersión del blanco; R es la distancia al blanco y χ es un coeficiente de atenuación.

Usando (4.50) y (4.52) en (4.51) se obtiene para P_r lo siguiente:

$$\bar{P}_r = \frac{P_T G_o^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \times \iiint \sigma n(\sigma) \frac{h^2(R)}{R^2} f^2(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi d\sigma dR$$

donde G_o es el valor pico de G; la cantidad $\int \sigma n(\sigma) d\sigma$ es la reflectividad del volumen del blanco complejo y se denota por η , la cual en el caso general es una función de R, θ y ϕ . Si la precipita

ción es homogénea, η es independiente de coordenadas espaciales y -- considerando distribuciones gaussianas para la densidad de potencia dentro del pulso, de la ecuación anterior se obtiene la siguiente al efectuar las integraciones:

$$\bar{E}_r = \frac{P_T G_o^2 \lambda^2 h \theta_o \phi_o \eta}{4^5 \pi^2 \ln 2 R^2} \quad (4.53)$$

Aquí, θ_o y ϕ_o representan el patrón de radiación en dos planos perpendiculares en los puntos de media potencia; 'h' representa la longitud del pulso cuadrado equivalente cuya área es igual a la del pulso principal.

En la ecuación (4.53) el término $G_o^2 \theta_o \phi_o$ debe obtenerse a partir de mediciones directas del patrón de radiación de la antena que se este utilizando y se debe hacer notar que es válida solo cuando el blanco llene completamente el haz del radar.

CAPITULO V

CALIBRACION DEL SISTEMA DE RADAR

1. CONCEPTOS GENERALES

El radar es un instrumento muy eficaz en la medición de la precipitación en grandes áreas. Se basa en dos cantidades principales descritas en el capítulo anterior y que son la potencia recibida \bar{P}_r y el factor de reflectividad Z .

Sin embargo, las mediciones obtenidas en el radar varían de sistema a sistema y dependen de factores tales como: radar utilizado, distancia del radar al blanco, tamaño del área de medición, intervalos de tiempo de muestreo, localización geográfica, tipo de nube y técnicas de procesamiento de datos, además de condiciones atmosféricas que están fuera del control humano y variaciones en el mismo sistema como:

- Propagación Anómala
- Errores debido a la calibración del radar.
- Cambios en la sensibilidad del radar por el tiempo.
- Pérdida de reflectividad debido a la atenuación por la precipitación.
- Atenuación por el radome durante períodos de intensa lluvia.
- Errores en los promedios de la potencia recibida en regiones donde los gradientes de precipitación son muy altos.
- Relleno no uniforme del haz del radar con la precipitación.
- Intercepción del haz con el nivel de congelación.
- Presencia de granizo.
- Variación en la distribución del tamaño de las gotas de lluvia.
- Variación en el tipo de cristales de hielo.
- Movimientos verticales fuertes del aire, que afectan la velocidad de caída de las partículas.

- Evaporación o aumento de precipitación por debajo del haz de radar.
- Frecuencia de recolección de datos.

A causa de estas incertidumbres, y ya que no se cuenta con un instrumento patrón para calibrar el radar, se requiere de un medio para mantener el control de calidad de las estimaciones de precipitación derivadas u obtenidas con radar. Una corrección cuantitativa de las incertidumbres mencionadas anteriormente no se puede determinar ya que estas varían continuamente en tiempo y espacio.

Se han investigado varias técnicas de calibración para radar meteorológico. En general, estas técnicas pueden dividirse en dos grupos:

- a). Aquellas que miden el efecto individual de componentes en el transmisor y en el receptor.

Algunas de las que se encuentran en este grupo son las siguientes:

1. Calibración del radar usando el sol como una fuente de radio. Esta técnica permite conocer exactamente la ganancia de la antena y la orientación correcta del equipo.
2. Calibración del radar por medio de un transponder. Esta técnica proporciona una calibración de potencia separada y continua del sistema transmisor y receptor.
3. Calibración de la reflectividad del radar usando blancos fijos. Esta técnica se basa en medir la reflectividad de un blanco fijo conocido en las mejores condiciones para tomarlo como referencia de calibración.
4. Calibración del radar por medio de simulación de señales: El objetivo de esta técnica es generar señales (calibradas) de prueba con propiedades similares a las de los ecos de radar tales como: nubes, tormentas, lluvia, etc. de naturaleza estocástica.

El otro grupo de técnicas es el siguiente:

- b). Aquellas que proporcionan una calibración total a todo

el sistema sin tomar en cuenta las contribuciones de --
los componentes.

Las técnicas que se encuentran dentro de este grupo han sido estudiadas con mayor interés debido a la conveniencia de abarcar todas las incertidumbres de los componentes.

Por esta razón se explicarán algunas de ellas en este capítulo.

2. CALIBRACION GENERAL DEL SISTEMA.

2.1 MEDICION DE PARAMETROS

El sistema de radar como instrumento de medición debe ser calibrado y ajustado para la operación correcta de sus partes. Esta calibración se lleva a cabo periódicamente en todas las estaciones de Radar en México, en las cuales se miden y registran los parámetros reales del sistema para compararlos con un conjunto de especificaciones y verificar que el equipo este funcionando correctamente.

La Tabla V.1 muestra un ejemplo de las mediciones que deben realizarse así como los valores típicos.

Las mediciones dadas en la tabla dan un índice del funcionamiento general del sistema. Sin embargo, el sistema se debe de calibrar electrónicamente, basándose en algunas de las mediciones efectuadas de acuerdo a dicha tabla para registrar la potencia recibida correctamente de acuerdo a los niveles de intensidad de lluvia que se detectan.

2.2 CALIBRACION ELÉCTRICA

Esta calibración consiste en aplicar una potencia precalculada con un generador de señales de SHF en el acoplador bidireccional, correspondiente a los seis niveles de intensidad que detecta el radar.

El procedimiento simplificado del cálculo de la potencia es el siguiente:

- a). Se determina la potencia recibida en dBm en la antena para los seis niveles de intensidad de precipitación mediante la relación siguiente

TABLA V. 1

REPORTE DE MANTENIMIENTO DE RADARES

Estación _____ Tipo de Radar WSR-74C Fecha _____
 _____ DIA MES AÑO

1) Frecuencia del Magnetron 3.625 GHz

2) Frecuencia de los pulsos (prt) 259 pps

3) Potencia transmitida, Transmisor
 lectura bolómetro 1.08 dbm; ancho del pulso (z) 3.0 μ seg

Factor de corrección (10 log [1/prt(z)]) 31.1 dbm; acoplador 30.2 db
 atenuador 20.0 db; cables 1.6 db

Potencia (transmisor) 83.98 dbm 250 Kw

ANTENA

Lectura bolómetro 0.8 dbm; acoplador 31.3 db

atenuador 18.88 db; cables: 0.0 db

Potencia (Antena) 83.08 dbm 203.24 Kw

Pérdida en la guía de ondas: -0.9 db

4) Señal Mínima Discernible (MDS) (sensibilidad del Receptor)

Lectura en el generador 73.0 dbm; cables 3.8 db

acoplador 30.2 db; otras atenuaciones 0 db

MDS -107.0 dbm

5) VSWR de la guía de ondas

Lectura bolómetro D-2.7 I-34.5 dbm; acoplador 30.6 db

factor de corrección 31.1 db; atenuador 20.0 db

VSWR 1.028

6) Oscilador local y mezcladores

Vídeo máximo en MFC 48 AFC-1 55 mV AFC-2 40 mV

SIG 1 60 mV SIG 2 55 mV

7) Tiempo de Funcionamiento

Radlación _____ Filamento _____

Tiempo total de mantenimiento _____

Ingeniero de Mantenimiento

$$P_r = P_T^* + C_R + Z + U \quad \text{dBm}^* \quad (5.1)$$

en donde:

- P_T es la potencia transmitida en la antena medida en el punto 3 de la tabla V. 1.
- C_R es la constante del radar** depende de las características del equipo y esta dada por:

$$C_R = \frac{\pi^3 G^2 \theta^2 l / K^2}{1024 \text{ Ln} 2 \lambda^2 R} \quad (5.2)$$

- Z es el factor de reflectividad determinado en la Tabla V.2 columna 3 para los seis niveles de intensidad y está definido por:

$$Z = 486 I^{1.37} \quad (5.3)$$

- U es un factor para la compatibilidad de unidades y tiene un valor fijo siempre y cuando las unidades sean las mismas a las utilizadas en este capítulo.

$$U = - 90 \quad \text{dBm}$$

TABLA V. 2

VALORES DEL FACTOR DE REFLECTIVIDAD Z PARA LOS SEIS NIVELES DE INTENSIDAD DE PRECIPITACION.

INTENSIDAD DE PRECIPITACION	PRECIPITACION CONVECTIVA mm/hr	FACTOR DE REFLECTIVIDAD Z en dBz.
LIGERO	0.0 a 5.08	--
MODERADO	5.08 a 27.94	36.54
FUERTE	27.94 a 55.88	46.68
MUY FUERTE	55.88 a 104.30	50.80
INTENSA	104.30 a 180.34	54.52
EXTREMA	mayor a 180.34	57.77

* La relación de la potencia recibida es la deducida en el párrafo 2. del capítulo IV. . Esta representada con sumas ya que por facilidad se manejan unidades en decibeles.

** Definida en la ecuación 4.3 del capítulo IV .

Si la potencia transmitida medida en el acoplador bidireccional es de 83.98 dBm (250 Kw), la potencia transmitida medida en el acoplador de la antena es de 83.08 dBm y las características del equipo son las siguientes:

$$G = 40 \text{ dB} = 1000$$

$$\theta = 1.6^\circ = .279 \text{ radianes}$$

$$l = C (\tau) = (3 \times 10^5) (3 \times 10^{-6}) = 9 \times 10^5 \text{ mm}$$

$$\lambda = C/f = (3 \times 10^5)/(5625 \times 10^6) = 53.3 \text{ mm}$$

$$R = 230 \text{ km} = 230 \times 10^6 \text{ mm}$$

$$K = 0.93$$

Se tiene que al sustituir en (5.2)

$$C_R = 1.761 \times 10^{-11} \left[\frac{1}{\text{mm}^3} \right]$$

ó en dB:

$$C_R = 10 \log (1.761 \times 10^{-11}) = -107.5 \text{ dB}$$

Los niveles de potencia recibidos en el acoplador de la antena se obtienen con la relación (5.1) y estan dados en la Tabla V. 3 columna 3.

TABLA V. 3

POTENCIA RECIBIDA DE LOS SEIS NIVELES Y LA CORRESPONDIENTE DEL GENERADOR DE SEÑALES.

INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/hr)	NIVEL DEL DVIP	POT RECIBIDA EN EL ACOP.ANT. (dBm)	POTENCIA DEL GENERADOR (dBm)
0.0 a 5.08	1	1 dB por encima del ruido	--
5.08 a 27.94	2	- 77.88	-46.49
27.94 a 55.88	3	- 67.74	-36.84
55.88 a 104.30	4	- 63.62	-32.72
104.30 a 180.34	5	- 59.90	-29.0
mayor a 180.34	6	- 56.65	-25.75

b). La posición en donde debe estar puesto el generador para ser conectado en el acoplador bidireccional (para calibrar los niveles del DVIP) se encuentra restando las pérdidas de la guía de ondas y las pérdidas de acoplamiento

(cables y acoplador bidireccional) de los niveles de potencia recibidos en la antena, esto es:

$$P_G = P_r - P.G.O - P_e \quad (5.4)$$

en donde: P_G es la potencia del generador calculada para los seis niveles, $P.G.O$ son las pérdidas de la guía de ondas y P_e son las pérdidas en cables y acoplador, si P_r son los valores calculados de acuerdo a la Tabla V.3 columna 3 ; $P.G.O$ esta definida como:

$$P.G.O = P_T - P_A$$

donde P_T es potencia de transmisión en el transmisor y P_A es potencia de transmisión en la antena.

$$\begin{aligned} P.G.O &= 83.98 - 83.08 \\ &= 0.9 \text{ dB} \end{aligned}$$

Las pérdidas de cables es de 1.6 dB y la pérdida del acoplador es de 30.2 dB, entonces:

$$P_e = - 31.8 \text{ dB.}$$

Con estos valores se calcula P_G de la ecuación (5.4) para los seis niveles, obteniéndose los datos en la Tabla V.3 columna 4 . Estos son los valores que se inyectan al acoplador bidireccional para simular que es la potencia recibida de los seis niveles. De esta forma, se ajustan determinados circuitos para que al inyectar un cierto nivel, corresponde exactamente al visto en las pantallas.

3. CALIBRACION DEL RADAR CON UN BLANCO CONOCIDO

Esta técnica se basa en suspender un blanco de radar estandar tal como una esfera de metal con características conocidas (dimensiones, factor de reflectividad, etc), de tal manera que el radar debe ser ajustado mecánica y electronicamente para que a partir de la potencia recibida puedan determinarse las características del objeto.

La ventaja que presenta este método es que de llevarse a cabo se tendrían mediciones con alto grado de exactitud. Las desventajas que se presentan son que la esfera debe ser de dimensiones que cubran el haz del radar y las dificultades para mantenerla en una misma posición. Se tiene la alternativa de colocar la esfera en algún sitio en tierra pero teniendo consecuentemente la presencia de los ecos de tierra que podrían alterar las mediciones.

4. CALIBRACION DEL RADAR CON PLUVIOMETROS

Este método se basa en la comparación continua entre los datos de radar y los de uno o varios pluviógrafos que sirven como referencia para calibrarlo y así obtener un factor de ajuste promedio o un campo de factores de ajuste a partir de una distribución dispersa de pluviógrafos, que aplicados a los datos de radar permitan cuantificar la cantidad de lluvia en el resto de la zona cubierta por el mismo.

Esta metodología tiene como base la relación expresada por la ecuación del radar entre la potencia de las ondas de radio reflejadas por la nube (medida en el radar) y sus características de reflectividad, las cuales a su vez están relacionadas con la intensidad de la precipitación.

Ya que los pluviógrafos son usados para la calibración del radar, se debe tomar en cuenta que las mediciones comparadas son de diferente carácter: los pluviógrafos dan un valor instantáneo de intensidad de lluvia en un punto, mientras que los valores obtenidos con radar corresponden a un volumen lleno de partículas de precipitación de diversos tipos y tamaños y del cual se obtiene un promedio de la intensidad de la energía electromagnética dispersada por el mismo (Figura V.1).

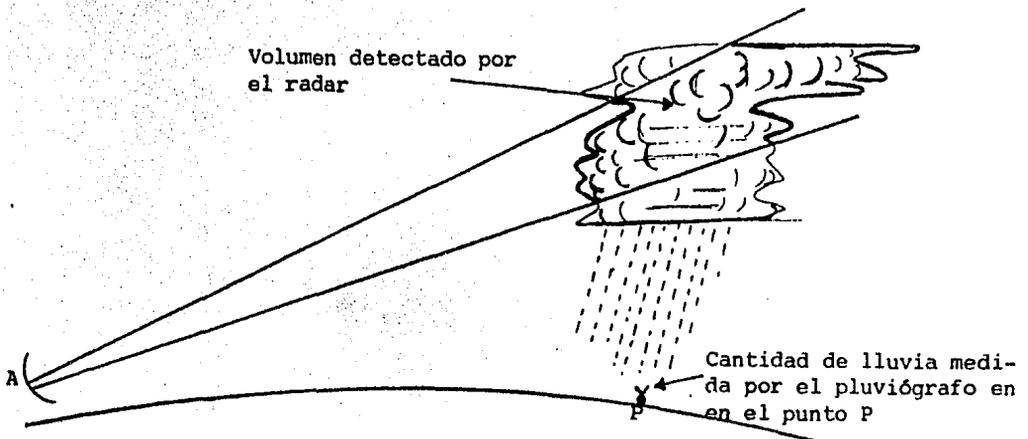


FIGURA V.1 COMPARACION DEL VOLUMEN DE PRECIPITACION DETECTADO CON RADAR Y CON PLUVIOGRAFO.

El volumen promediado del radar esta relacionado con el ancho del haz y/o con el proceso de integración que se lleva a cabo. Además las mediciones de intensidad de lluvia con radar son hechas a una altura apreciable sobre la superficie terrestre. Aún, si las mediciones se hicieran por debajo de la base de las nubes y los efectos de desplazamiento debido a los vientos de bajo nivel, la evaporación y el cambio en el tamaño de las gotas no fueran considerados, existiría un tiempo de retraso entre las mediciones de radar y pluviógrafo.

Por estas razones, la comparación radar-pluviógrafo es aceptablemente buena cuando se consideran cantidades totales de intensidad de lluvia por varias horas. Las comparaciones instantáneas muestran grandes diferencias debido a los problemas en la conversión de la reflectividad a intensidad de lluvia y también al carácter diferente de las dos mediciones.

4.1 TECNICA BASADA EN LA DETERMINACION DE FACTORES DE AJUSTE

Los pluviógrafos pueden ser usados para ajustar o corregir las estimaciones de precipitación con radar.

El objetivo de combinar los datos de radar y pluviógrafo es utilizar el radar para especificar la distribución de precipitación espacial y los pluviógrafos para especificar la magnitud de la precipitación.

Ya que la utilidad de un solo factor de calibración generalmente disminuye conforme aumenta la distancia con respecto al pluviógrafo, un campo de factores de ajuste determinados a partir de una distribución dispersa de pluviógrafos es muy efectivo para mejorar las estimaciones de radar que un solo factor de ajuste promedio. Los dos procedimientos han sido probados en Estados Unidos y se ha encontrado que el campo de factores de ajuste proporcionan mejores resultados.

La conveniencia de usar un procedimiento u otro es parcialmente dependiente de la variabilidad relativa en tiempo y espacio de los factores de ajuste. La Figura V.2 muestra la variabilidad para la relación entre estimaciones de pluviógrafo y radar para un pe-

riodo de 93 días en los alrededores de la zona del Lago Ontario.

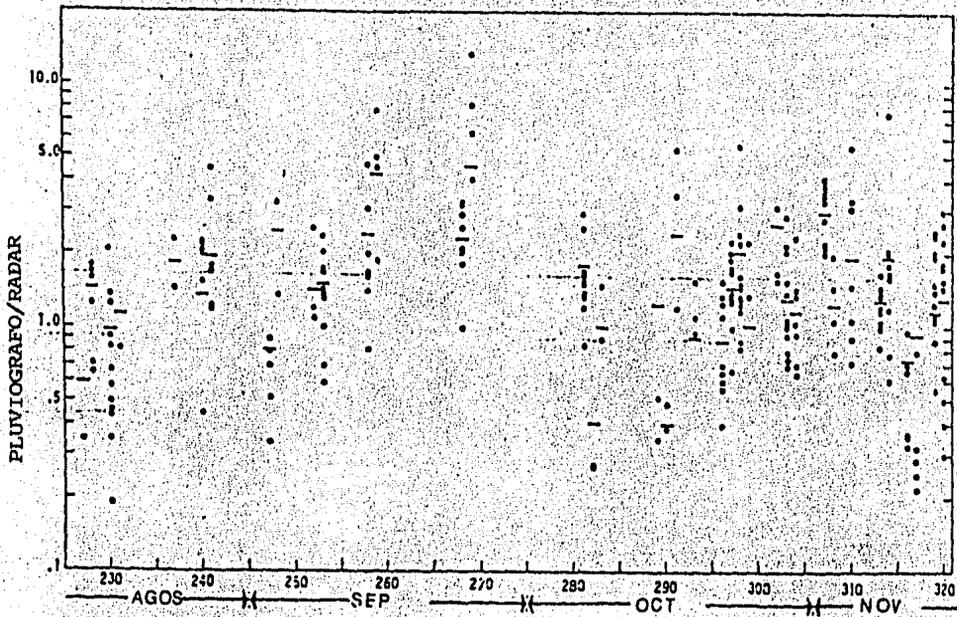


FIGURA V.2 COMPARACION DE ESTIMACIONES DE PLUVIOGRAFOS Y RADAR PARA UN PERIODO DE 93 DIAS.

Los círculos representan la relación de 15 pluviógrafos dispersos - en distancias que varían de 50 a 135 Km alrededor del radar. Las - barras indican la relación promedio del día basada en todos los pluviógrafos. Dicha figura indica que hay grandes variaciones en tiempo y espacio en la relación de las estimaciones pluviógrafo-radar, de tal forma que para mejorar las estimaciones de radar se les debe aplicar un factor de ajuste o un campo de factores corrección.

Ha habido ocasiones en que la precipitación en los alrededores del pluviógrafo de calibración es altamente variable provocando que la medición no sea representativa de la precipitación que es muestreada por el radar. De hecho, se ha encontrado que factores de ajuste erróneos frecuentemente ocurren cuando la precipitación cerca - de los pluviógrafos fue altamente variable o la cantidad de preci-

pitación fue muy pequeña (menor de 1-2 mm).

4.2 DESCRIPCION DE LAS TECNICAS DE CAMPO

Dos procedimientos básicos han sido probados en varios países los cuales utilizan los pluviógrafos para ajustar las estimaciones de radar.

1º Derivar un factor de ajuste que es aplicado igualmente - sobre la totalidad de una área.

2º Derivar un campo de factores de ajuste a partir de la relación de pluviógrafos individuales y estimaciones de radar. De esta manera, el ajuste del radar en un punto dependerá del pluviógrafo más cercano.

Un ejemplo usando el primer procedimiento fue hecho en Norman, Oklahoma en donde las lecturas individuales de pluviógrafos ampliamente dispersos son comparados con las lecturas de lluvia de radar obtenidas a partir de la potencia de radar promediada dentro de los 25 km² alrededor de cada pluviógrafo. La relación de las lecturas pluviógrafo-radar en cada sitio proporcionan un factor de calibración para la zona circundante.

Una variación de este método es determinar un factor de ajuste promedio. Con este método se han encontrado mejores resultados utilizando varias agrupaciones de aproximadamente 5 pluviógrafos cada una en una área de 50 km² y estas agrupaciones distribuidas en una área total de 10,000 km².

La cantidad de lluvia obtenida con radar debe ser ajustada diariamente por medio de la siguiente relación.

$$F_A = \frac{V_P}{V_R}$$

en donde:

- F_A - Factor de ajuste diario aplicado a una área entera.
- V_P - Volumen de agua acumulada en el área de los pluviógrafos en un determinado tiempo.
- V_R - Volumen de agua determinado a partir de las estimaciones de radar en un determinado tiempo.

De esta forma, las estimaciones de lluvia derivadas de radar son -
ajustadas mediante la siguiente expresión:

$$I_{RA} = F_A \cdot I_R$$

en donde:

- I_{RA} - Estimaciones de lluvia ajustadas medidas en el radar.
- F_A - Factor de ajuste
- I_R - Estimación de lluvia no ajustada medida en el radar.

El factor de ajuste es la relación de los volúmenes de lluvia medida con pluviógrafos y radar.

Debido a que los pluviógrafos dan un valor instantáneo de lluvia - en el lugar donde están situados no se puede determinar directamente el volumen de agua V_p acumulado en el área donde se encuentran dichos medidores.

El método para determinarlo es a partir de un análisis de isoyetas en el área que cubren los pluviógrafos (Figura V. 3)

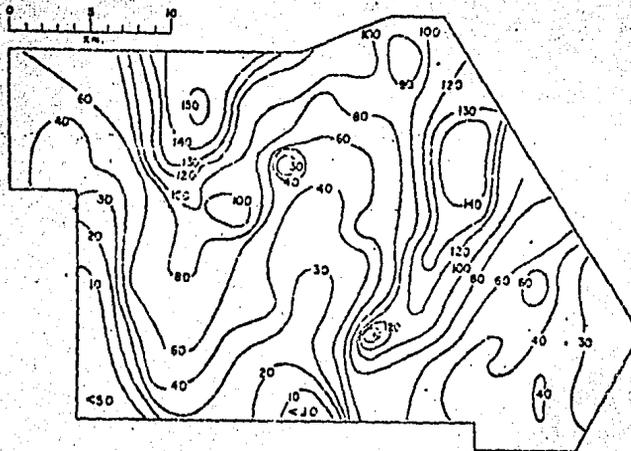


FIGURA V.3 ANALISIS DE ISOYETAS

En el mapa de isoyetas se determinan las áreas individuales entre línea y línea y se multiplica cada una por el promedio de la cantidad de lluvia marcada entre líneas para obtener el volumen de agua en cada área, posteriormente se hace la suma de los volúmenes individuales y se obtiene el volumen total de agua en la zona que cubren los pluviógrafos.

Para obtener el volumen de agua V_R a partir de las mediciones de radar en la zona de los pluviógrafos se sigue el siguiente procedimiento:

Se fotografían los ecos de la pantalla del radar y se proyectan en un mapa que cubre la zona del conjunto de los pluviógrafos en intervalos de 5 minutos. El contorno de las áreas puede medirse con planímetro. Se dibujan las áreas medidas en ejes cartesianos contra tiempo y se integra la curva (Figura V. 4).

El volumen total de agua se obtiene a partir de la sumatoria de los productos individuales del valor del área integrada con la intensidad de lluvia media.

Esto se puede expresar en los términos dados en la Figura V.4 como:

Volumen en el área individual :

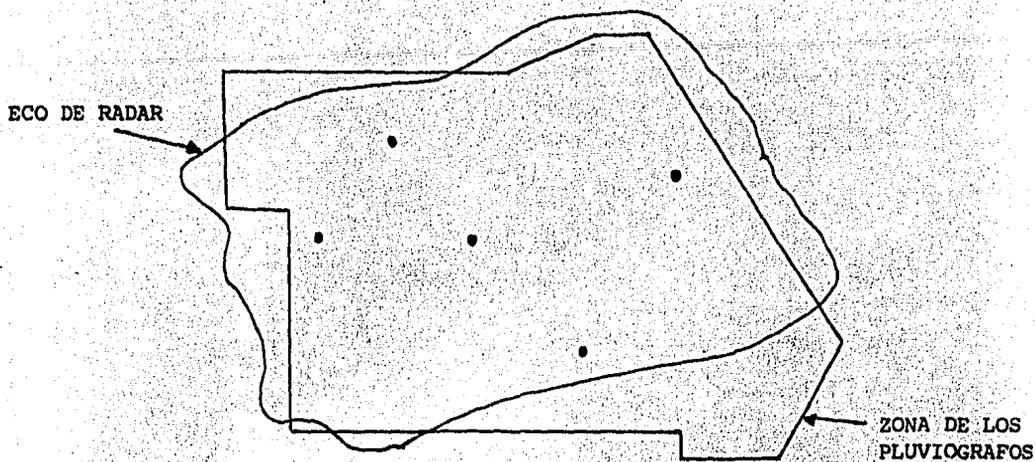
$$V_n = A_n \frac{I_n + I_{n+1}}{2}$$

Volumen total:

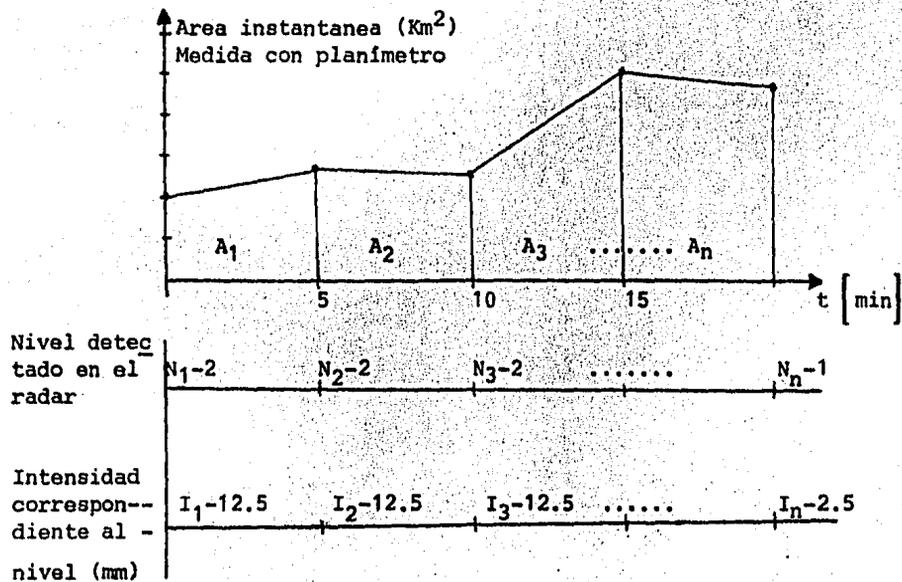
$$V_R = \sum_n V_n$$

$$V_R = \sum_{i=1}^n A_n \frac{I_n + I_{n+1}}{2}$$

Dentro del segundo procedimiento para determinar un campo de factores de ajuste se ha desarrollado un método llamado "Análisis Objetivo", en el cual es usado para mover el factor de corrección determinado en un sitio a cualquier otro punto dándole un peso al factor de ajuste. El método esta basado en una distribución amplia de pluviógrafos individuales. Los datos de pluviógrafos son usados para derivar un campo de ajuste y estimar la precipitación en áreas sin datos de radar (áreas con propagación anómala, -ecos de tierra, haz bloqueado), la técnica sigue cuatro pasos:



a) SUPERPOSICION DEL ECO DE RADAR EN LA ZONA DE LOS PLUVIOGRAFOS (PROYECCIONES CADA 5 MINUTOS)



b) INTEGRACION DE LAS AREAS INDIVIDUALES

FIGURA V.4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE AGUA EN UNA AREA A PARTIR DE LAS MEDICIONES DE RADAR

a). Determinación de un campo de precipitación derivado de radar no calibrado.

Se determina una rejilla en el área de prueba en un formato de ángulo-distancia (Figura V. 5).

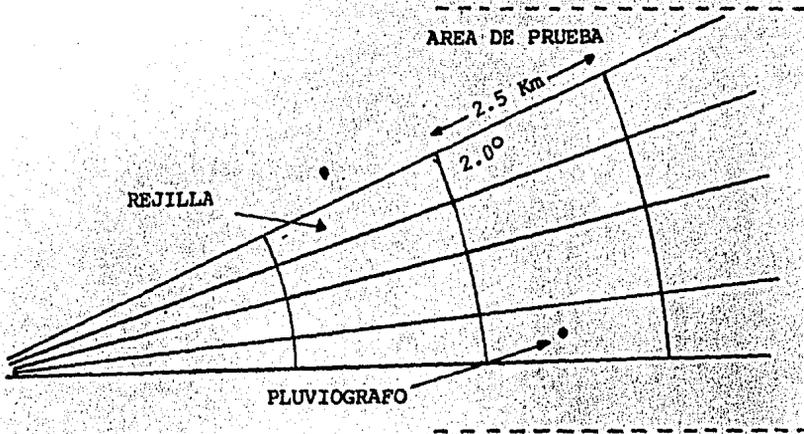


FIGURA V.5 REJILLA EN EL AREA DE PRUEBA EN COORDENADAS POLARES

y se calcula la lluvia acumulada en cada rejilla que cubre un espacio de 2° por 2.3 km aproximadamente.

b). Determinación de un campo de radar calibrado.

El campo de radar determinado en el paso a) es calibrado con las -- observaciones de los pluviógrafos, calculando factores de calibración multiplicativos en cada sitio de los pluviógrafos registrando al menos 2.5 mm; valores menores que éste no son usados para no pro vocar factores erróneos.

En las rejillas donde no hay pluviógrafos se mueve el factor de -- corrección. El peso (W_{ti}) que se le da a cada pluviógrafo (G_i) para una rejilla particular esta dado por:

$$W_{ti} = e^{(-d^2/EP)}$$

donde d es la distancia (km) entre el pluviógrafo y la rejilla. EP es un factor que depende de la densidad de los pluviógrafos. La --

Tabla V.4 da el valor de EP para dos densidades.

TABLA V.4
CONSTANTE DE PESO EP (en km^2)

	Densidad de pluviógrafos.	
	$1/900 \text{ km}^2$	$1/1600 \text{ km}^2$
Campo de Radar calibrado	300	450
Campo de precipitación derivado solo con pluviógrafos	200	350

La Figura V.6 presenta la relación entre el peso de la observación y la distancia para varios valores de EP.

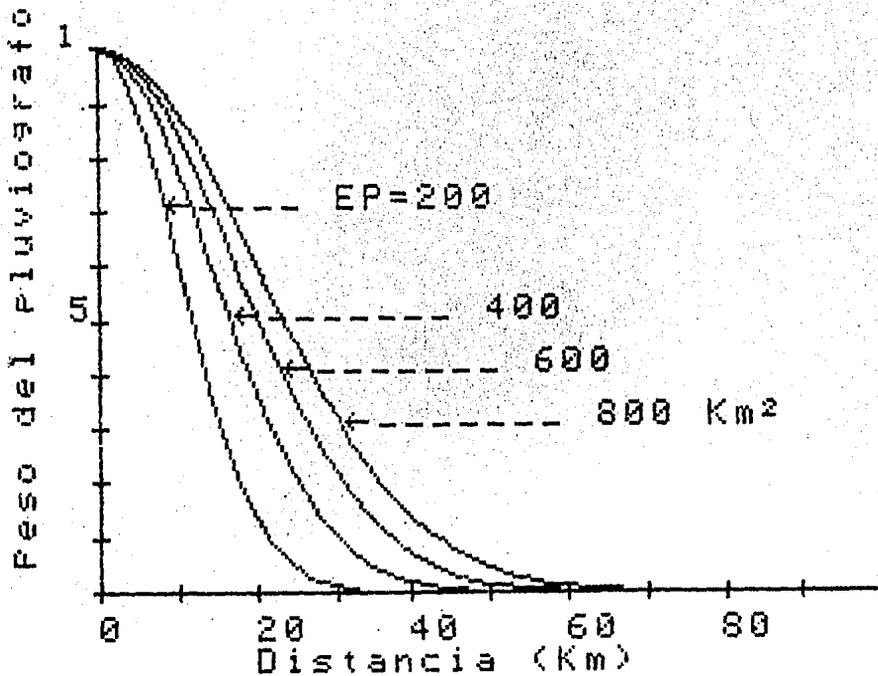


Figura V.6 RELACION DE PESO DEL PLUVIOGRAFO A DIFERENTES DISTANCIAS Y VALORES DE 'EP'.

Para determinar el factor de corrección se llevan a cabo dos pasos:
 1º Determinar un factor F_1 en función del peso y del valor del pluviógrafo:

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^N WT_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^N WT_i}$$

donde N es el número de pluviógrafos.

2º Se determina la diferencia D_i para cada pluviógrafo.

$$D_i = G_i - F_1$$

3º Se determina el factor de calibración F_2 con EP al 50% dado por:

$$F_2 = F_1 + \frac{\sum WT_i \cdot G_i}{\sum WT_i}$$

La multiplicación del factor F_2 en cada rejilla con el campo de radar no calibrado produce el campo de precipitación con radar (calibrado) corregido.

c). Campo de precipitación derivado solo de pluviógrafos.

Para determinar este campo se utilizan todos los datos de pluviógrafos, incluyendo los que registran valores menores de 2.5 mm y valores donde no hay datos cuantitativos de radar.

El procedimiento es similar al descrito en el paso b), excepto que los valores de EP son tomados de acuerdo a la Tabla V.4. A la distancia media del espaciamiento entre estaciones, el peso llega a ser de aproximadamente 0.01. El radio máximo de influencia para esta estimación está definido como la distancia la cual la lluvia total no está correlacionada.

d). Campo de precipitación combinado.

Las distribuciones de lluvia estimadas con pluviógrafo y las de radar corregido son combinadas en el campo de radar calibrado. En las regiones del radar con ecos fijos, a grandes distancias del radar, cuando los datos del radar están incompletos (debido a fallas del equipo) o cuando la propagación anómala ha aumentado el área de los ecos de precipitación, se puede utilizar el campo de precipitación derivado solo de pluviógrafos. Cuando solamente se tiene

una fuente que indique la precipitación, es considerada como verdadera.

Se debe tomar en cuenta que los factores de ajuste son calculados para un determinado tiempo; en estos estudios, se ha considerado análisis de 24 horas. Sin embargo, entre menor sea el tiempo de análisis para la determinación de F_A mayor será la exactitud en las estimaciones de radar dentro y fuera del área de calibración y consecuentemente aumentará la cantidad de datos a manipular de tal forma que es imposible llevar a cabo el análisis manualmente. Debido a esto, se han elaborado métodos para obtener y comparar las estimaciones de lluvia con radar por medio de computadora de la misma forma que el método manual; el método por computadora es totalmente diferente debido al análisis teórico de las técnicas de integración y procesamiento necesarias para digitalizar y registrar la potencia retornada así como las mediciones registradas en los pluviógrafos. Los métodos con computadora y sus aplicaciones se describirán en el capítulo VI.

4.3 COMPARACION DE LAS TECNICAS

Una comparación y resumen de la exactitud de las mediciones de precipitación ajustadas con pluviógrafos se muestra en la Tabla V. 5, considerando que las diferencias en las exactitudes de los métodos son influenciadas por algunas de las siguientes condiciones:

- Longitud del período de medición.
- Tamaño de área
- Distancia del radar
- Frecuencia de recolección de datos de radar
- Densidad de los pluviógrafos de calibración.

El error promedio marcado en dicha tabla es definido como:

$$E_p = \frac{R_o - R_e}{R_o} \times 100$$

donde R_o es la lluvia observada derivada de una red densa de pluviógrafos y R_e es la estimación de radar ajustada.

TABLA V.5

COMPARACION DEL ERROR PROMEDIO EN ESTIMACIONES DE RADAR
AJUSTADAS CON PLUVIOGRAFOS EN DIFERENTES EXPERIMENTOS *

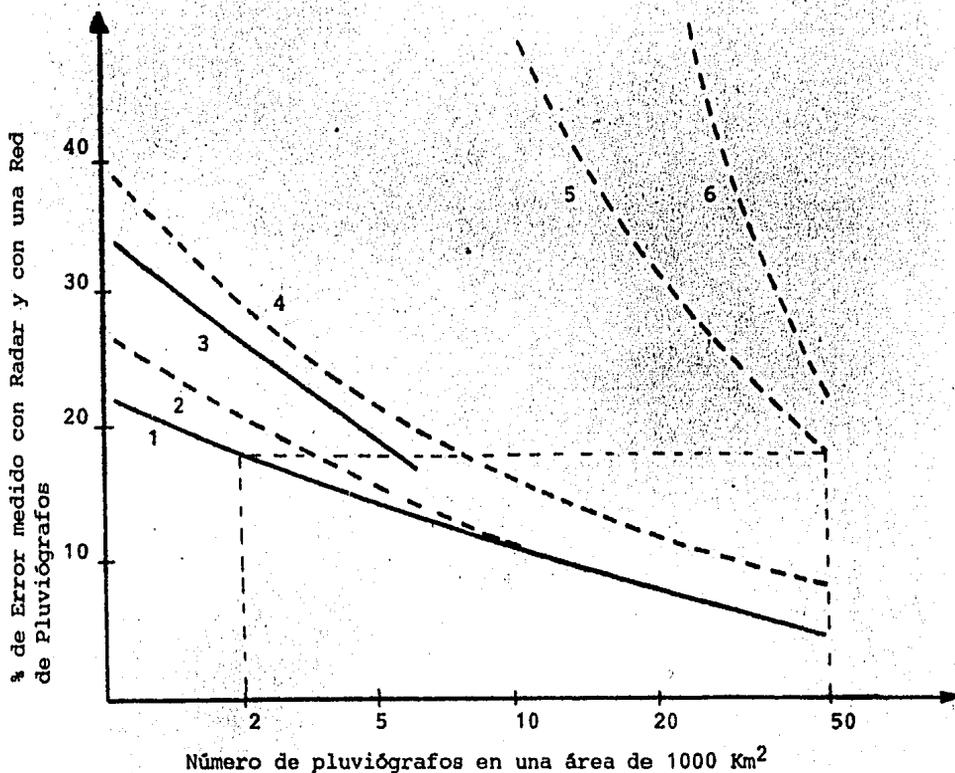
FUENTE DE DATOS	TORMENTA	TORMENTA	CHUBASCO	VERANO	LLUVIA	INVIERNO
TAMAÑO DE AREA (Km ²)	3500	4000	570	170	500	855
INTERVALO DE TIEMPO	TORMENTA	TORMENTA	24 Hrs.	24 Hrs.	1 Hrs.	24 Hrs.
DISTANCIA DEL RADAR (Km)	37 - 95	37 - 95	65 - 140	95 - 112	12 - 48	18 - 64
FRECUENCIA DE RECOLECCION (POR HORA)	6 - 12	12	12	6	60	6
DENSIDAD DE LOS PLUVIOGRA FOS DE CALIBRACION (1/Km ²)	1/1100	1/900	1/3250	1/275	1/700	1/800
PROCEDIMIENTO DE AJUSTE **	A	F	A	F	A	F
ERROR PROMEDIO (%)	28	13	15 - 24	24	14	15

* RESULTADOS DE EXPERIMENTOS REALIZADOS EN DIFERENTES LUGARES DE ESTADOS UNIDOS

** A - AJUSTE PROMEDIO
F - CAMPO DE FACTORES

Estos errores promedio varían del 9 al 28% los cuales se pueden atribuir a las diferencias de los parámetros en los experimentos, por ejemplo los errores pequeños tienden a ser asociados con mediciones a distancias cercanas al radar.

Otros resultados de las investigaciones en la exactitud determinada por un radar calibrado y una red de pluviógrafos de varias densidades se muestra en la Figura V.7.



- 1 Radar y pluviógrafos calibrados.
- 2 Lluvia extremadamente uniforme (solo pluviógrafos).
- 3 Radar con el haz interceptando áreas en fusión.
- 4 Lluvia típica dispersa (solo pluviógrafos).
- 5 Chubasco típico (solo pluviógrafos).
- 6 Tormentas (solo pluviógrafos).

FIGURA V.7 DIFERENCIAS ENTRE ESTIMACIONES DE LLUVIA RELACIONADA CON UNA RED DE DENSIDAD VARIABLE

Las líneas sólidas marcan el porcentaje de error medio entre estimaciones óptimas de lluvia horaria y estimaciones de radar calibrado usando varios sitios de calibración. La línea sólida inferior (mayor exactitud) representa el porcentaje de error cuando el haz del radar esta cubierto completamente por la lluvia. La línea superior es para las ocasiones cuando una mezcla de lluvia y nieve en fusión esta dentro del haz.

Las líneas punteadas representan el porcentaje de error entre las estimaciones óptimas de lluvia horaria y estimaciones usando un gran número de pluviómetros sin datos de radar. Las líneas superiores son para lluvia dispersa.

La figura puede ser usada, por ejemplo, para determinar el número de pluviómetros requeridos para medir la lluvia con la misma exactitud que con un sistema de radar calibrado con un número específico de sitios de pluviómetros. Por ejemplo, en un chubasco típico el sistema de radar calibrado con dos sitios de pluviómetros daría la misma exactitud ($\approx 18\%$) que una red de aproximadamente 50 pluviómetros en una área de 1000 km^2 .

4.4 TECNICA DE CALIBRACION UTILIZADA EN LA ESTACION DE RADAR DE TAMPICO.

La técnica utilizada en la estación de Tampico consiste en determinar un factor de ajuste promedio para períodos de 24 horas.

El método para la obtención de la información consiste exactamente en calcar sobre una plantilla cuadrículada (en donde cada cuadro representa una área de 400 km^2) de papel semitransparente superpuesta a la pantalla PPI del radar, los contornos de los ecos nubosos registrados en la pantalla del radar, haciendo al mismo tiempo anotaciones sobre el grado de intensidad de los ecos, complementándose lo anterior con datos detallados sobre la localización, altura, diámetro y movimiento de los ecos más significativos (Figuras V. 8 y V.8a).

La información obtenida se agrupa y representa por unas cuantas cifras y símbolos, toda la información obtenida en cada una de las áreas de 400 km^2 durante un tiempo generalmente de 24 horas. Di-

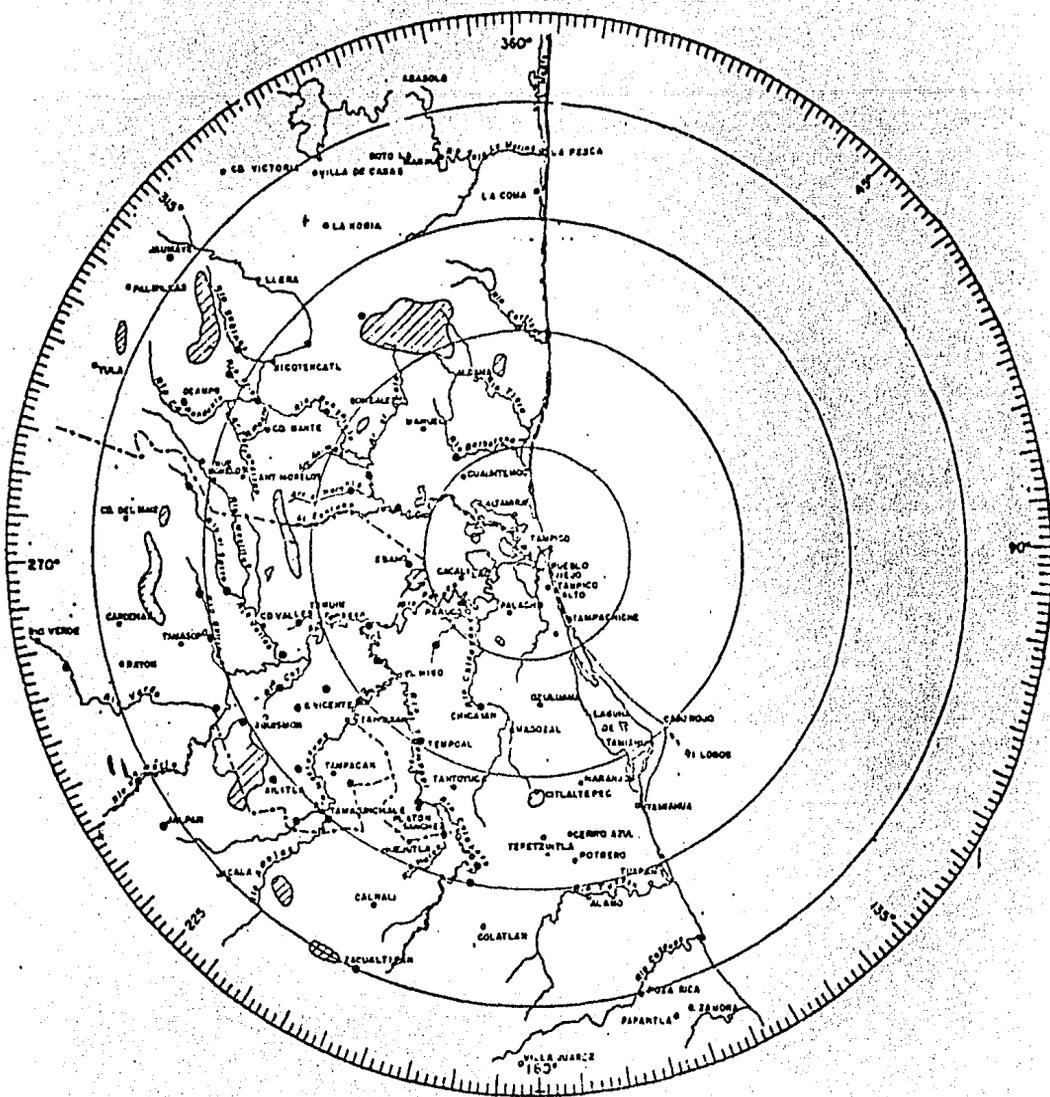


FIGURA V.8 LOCALIZACION DE LA ESTACION DE RADAR.

LA FIGURA MUESTRA UNA PLANTILLA QUE CORRESPONTE AL RANGO DE 230 KM DEL RADAR, MOSTRANDO LOS DETALLES MAS SIGNIFICATIVOS DE LAS CUENCAS Y LA LOCALIZACION DE LOS RIOS PRINCIPALES, ASI COMO LAS POBLACIONES Y ESTACIONES CLIMATOLOGICAS PARA QUE SEAN PUNTOS DE REFERENCIA.

FECHA OCTUBRE 25 DE 1977

HORA 11:30 HRS. (1730 Z)

CUMULO DIRECCION DISTANCIA NIVEL
7,500 MTS. 149° 34 KM 6

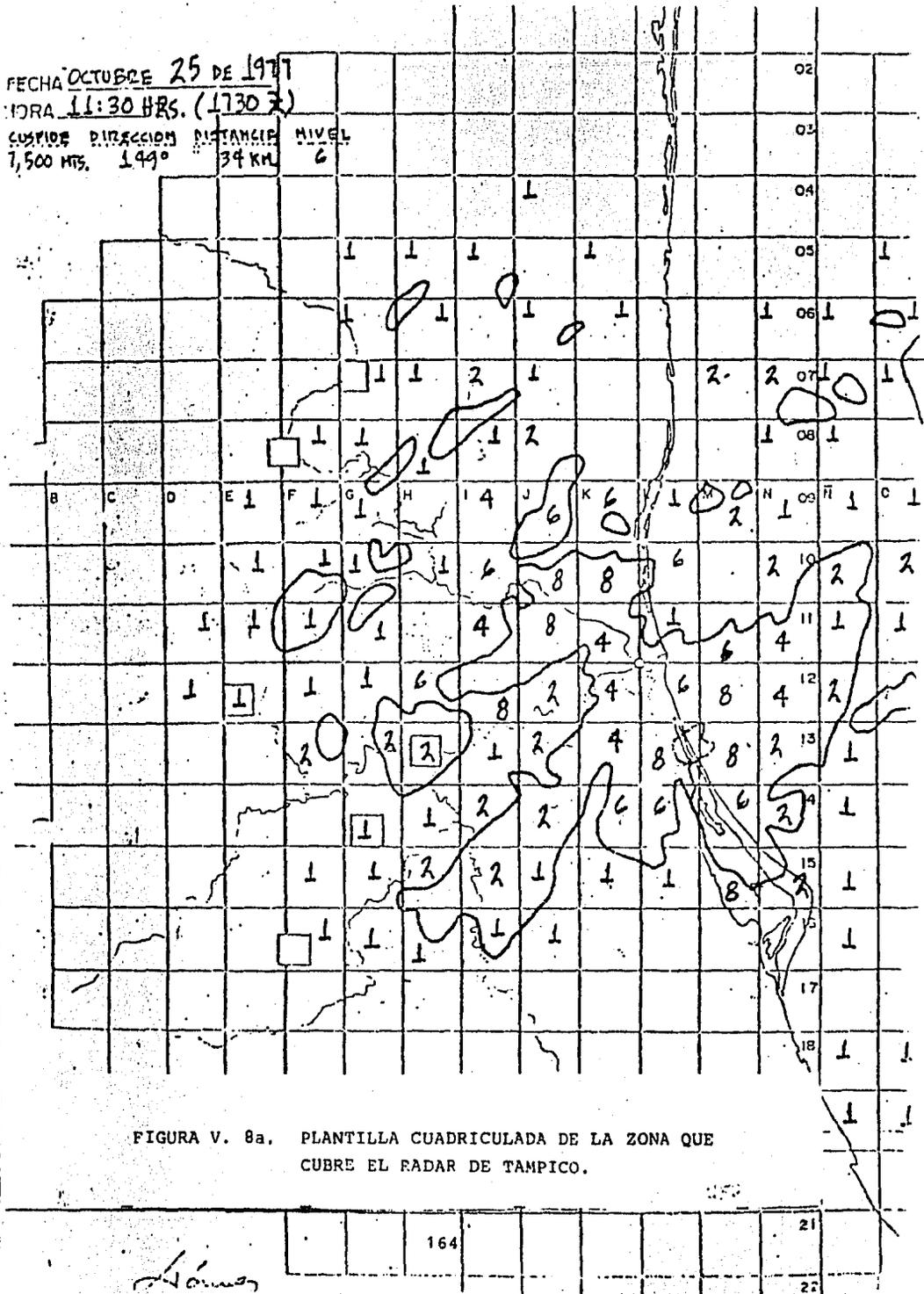


FIGURA V. 8a. PLANTILLA CUADRICULADA DE LA ZONA QUE CUBRE EL RADAR DE TAMPICO.

164

21

22

chas cifras estan dadas por una clave que comprende 9 digitos (Tabla V.6) cada uno de los cuales representa condiciones convencionales sobre la cobertura nubosa del área y la intensidad de los ecos asociados.

TABLA V.6

CLAVES PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR DE CORRELACION

CLAVE DE COMPUTACION Y % DE AREA		VALORES DVIP	CARACTER DE LAS LLUVIAS ASOCIADAS	RANGO DE ACUMULACION DE LA LLUVIA (mm/H)	AGRUPACION DE LAS OBSERVACIONES	CATEGORIA DE LAS OBSERV.
50%	50%					
1	1	1	LIGERAS	2.5	(1 a 5)	a:SOLO B
2	3	B* 2	MODERADAS	2.5-13	(6 a 10)	b:DOM. B
4	5	3	FUERTES	13-25	(11 a 20)	c: A=B
6	7	4	MUY FUERTES	25-50	(21 a 30)	d:SOLO A
8		A* 5	INTENSA	50-130	(> 30)	e:DOM. A
	9	6	EXTREMAS	> 130		

B* VALORES BAJOS

A* VALORES ALTOS

Un ejemplo de los datos agrupados en un día se muestra en la Figura V.9.

Una vez hecha la agrupación de 24 horas, se clasifican los cuadros en donde existen pluviógrafos y se comparan ambas mediciones en la gráfica de correlación de ecos de Radar-Lluvia como se muestra en la Figura V.10.

El factor de correlación se determina con la siguiente expresión:

$$F_c = \frac{\sum I_p / I_c}{N} \quad I_p / I_c \leq 1$$

en donde:

N - Es el número de pluviógrafos

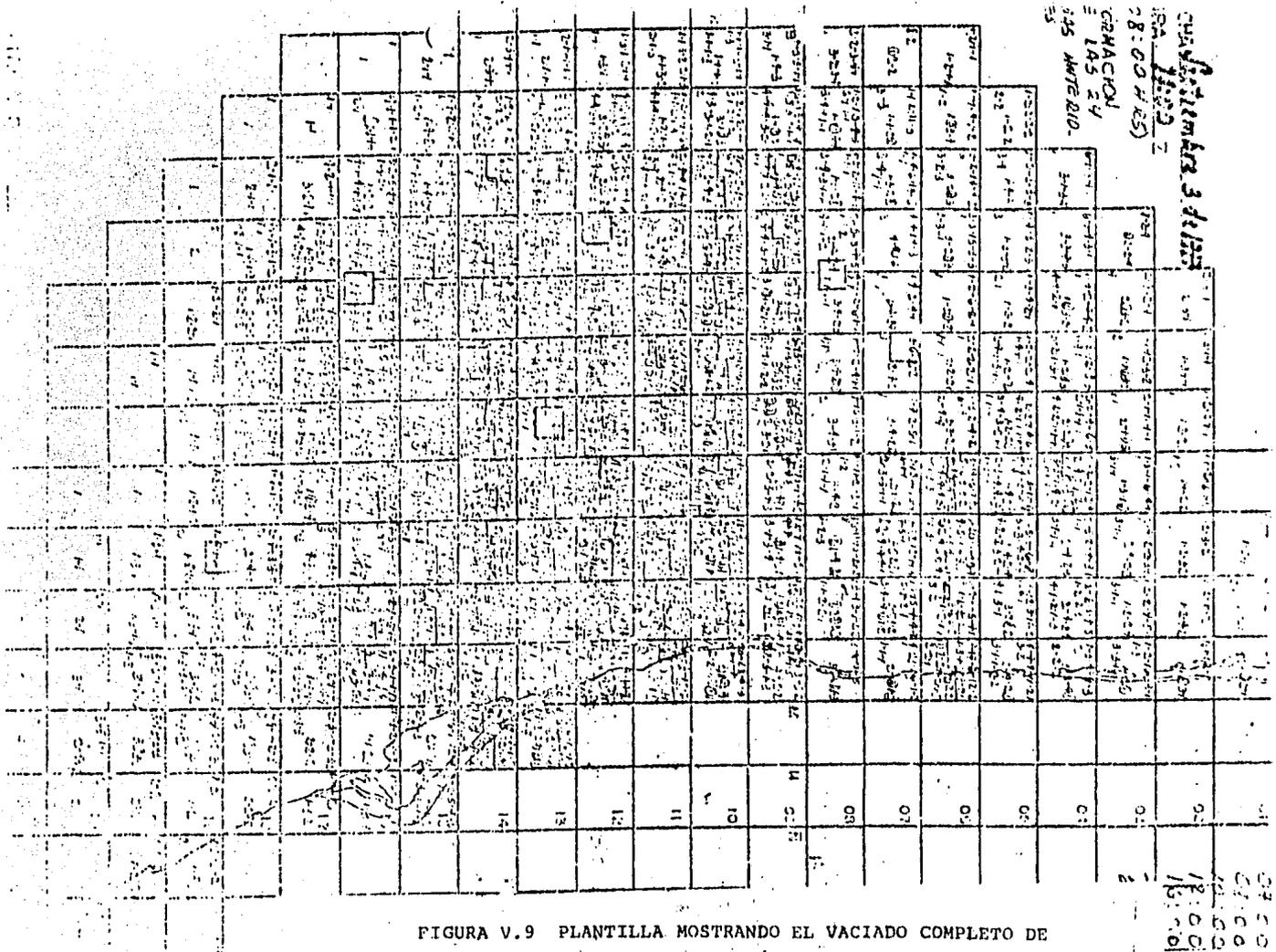


FIGURA V.9 PLANTILLA MOSTRANDO EL VACIADO COMPLETO DE LOS DATOS CLAVE, CORRESPONDIENTE A 24 HRS.

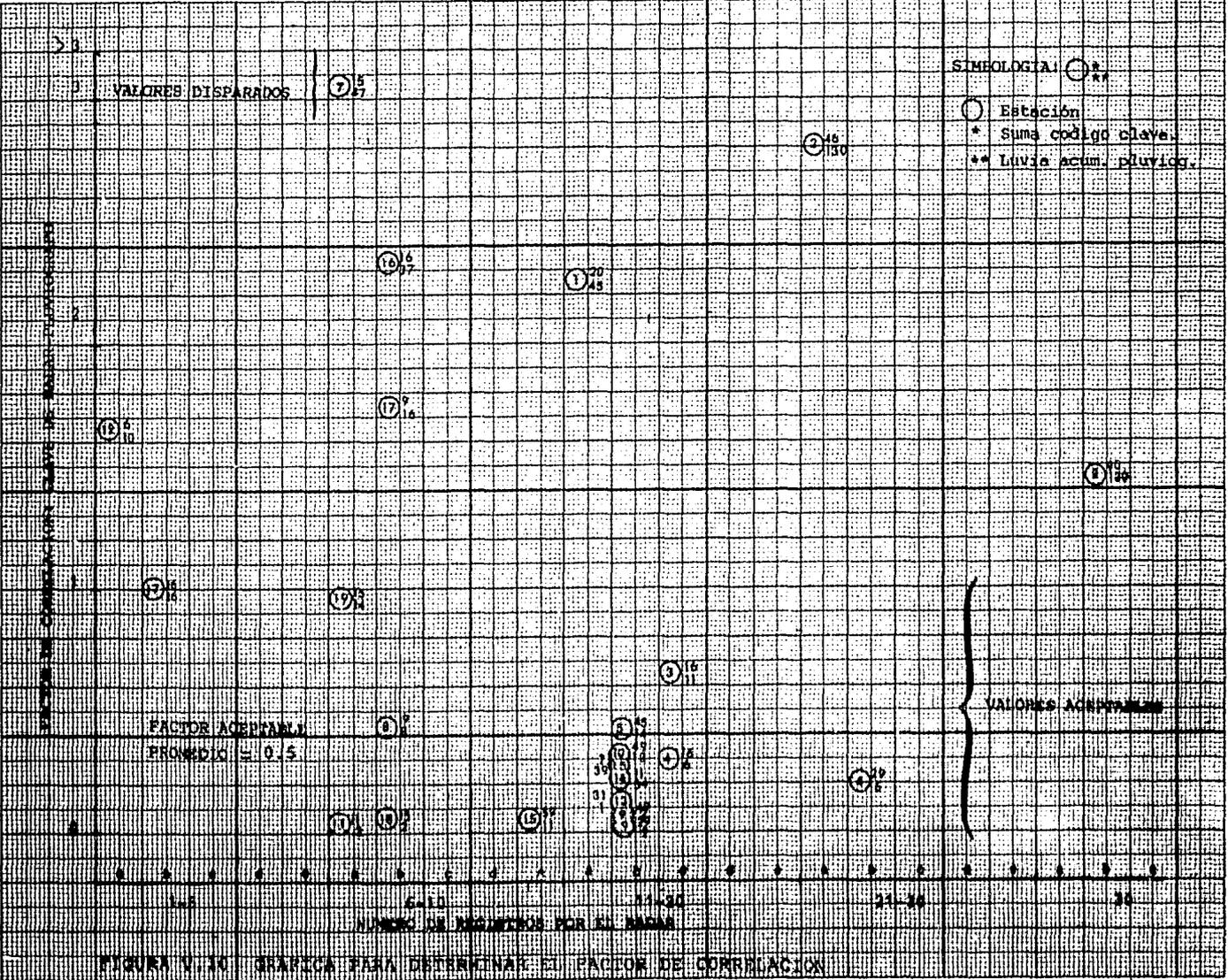


FIGURA V. 10 GRÁFICA PARA DETERMINAR EL FACTOR DE CORRELACION

I_p - es la lluvia acumulada medida en los pluviógrafos cada 24 horas.

I_c - es la suma de la clave determinada en 24 horas.

Se ha determinado diariamente el factor de correlación (calibración) durante un período de aproximadamente tres meses y se ha encontrado un factor promedio de 0.5.

Las diferencias entre las estimaciones de radar y la red de pluviógrafos en esa zona varía del 15 al 25% según las condiciones atmosféricas que presentan y otros factores como la atenuación por las -nubes o precipitación.

5. CALIBRACION DEL RADAR AJUSTANDO LA RELACION Z-I

5.1 METODOS GENERALES

La relación entre I y Z puede ser establecida esencialmente mediante dos aproximaciones diferentes.

a). Por el Método Directo en el cual los factores de reflectividad son medidos con radar y las cantidades o intensidades de lluvia con uno o varios pluviógrafos.

b). Por el Método Indirecto en el cual las distribuciones del tamaño de las partículas son medidas con un disdrómetro y los valores de I y Z son calculados a partir de dichas mediciones y la velocidad de caída de las partículas.

Se debe notar que en las dos aproximaciones existe una enorme diferencia entre el volumen de la región contribuyente en la generación del eco del radar (el cual raramente es menor de 10^6 m^3 y puede exceder a 10^{10} m^3) y el volumen tan pequeño que es muestreado por el instrumento medidor de la lluvia.

El método más común para derivar la relación I-Z a partir de las observaciones de dos variables es por medio de un análisis de regresión de los logaritmos de las dos variables mostrando los valores de I y Z en papel log-log y ajustar los puntos-datos a una línea recta. La Figura V.11 muestra un ejemplo del análisis a partir de las observaciones del tamaño de las gotas.

El resultado es una relación de potencia de la forma general.

$$I = R_z (Z/Z_0)^{1/b} \quad (5.5)$$

donde R_z y $1/b$ son los parámetros de intercepción y pendiente respectivamente de la línea de regresión. El valor Z_0 de referencia se toma generalmente de $1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$.

La ecuación (5.5) puede ser expresada en la forma general dada por:

$$Z = A I^b \quad (5.6)$$

donde:

$$A = R_z^{-b}$$

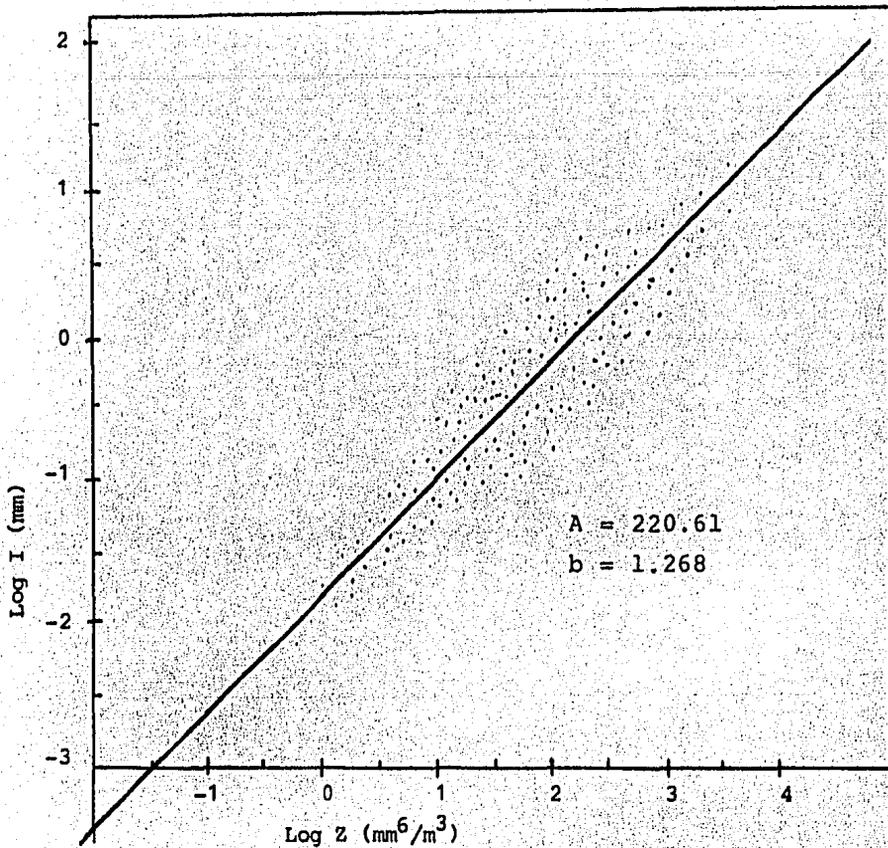


FIGURA V.11 GRAFICA OBTENIDA DEL ANALISIS DE REGRESION PARA LA RELACION I-Z.

Cuando este mismo procedimiento de análisis es aplicado a mediciones directas de intensidad de lluvia y factores de reflectividad de radar, las intensidades de lluvia calculadas son valores promedios obtenidos en períodos de tiempo cortos y la exactitud de las mediciones de intensidad de lluvia en estos períodos no es buena ya que los pluviógrafos convencionales proporcionan errores en las mediciones tanto a bajas como a muy altas intensidades de lluvia. Debido a estas dificultades en las mediciones directas, el análisis de regresión se lleva a cabo normalmente a partir de las distribuciones del tamaño de las gotas.

Una variación del método directo y que es el mas frecuentemente usado para determinar la relación I-Z es observar la lluvia en algún sitio en un período de tiempo tanto en el radar como en el pluviógrafo. La cantidad total de lluvia medida por el pluviógrafo se compa-

ra con la cantidad determinada por la integración apropiada de las mediciones de radar. El procedimiento usual es considerar una relación de potencias para I-Z del tipo de la ecuación (5.5), con un parámetro (comunmente $1/b$) fijo y entonces ajustar el valor del otro parámetro para hacer que las intensidades de lluvia de radar concuerden con la cantidad observada en el pluviógrafo. Un nuevo valor del parámetro variable en la relación I-Z es obtenido para cada período de medición.

Otra alternativa, la cual tiene la flexibilidad de ajustar ambos parámetros, esto es, el coeficiente R_z y el exponente $1/b$ en la relación I-Z dada por la ecuación (5.5), utiliza el método de optimización por computadora para variables múltiples. Este método requiere de una gran capacidad de memoria en computadora para manejar la gran cantidad de datos requeridos para la optimización.

Ya que los resultados obtenidos con esta técnica han sido muy satisfactorios, se describirá el procedimiento a continuación:

5.2 TECNICA DE OPTIMIZACION

La técnica de optimización maneja dos conjuntos de datos: uno que representa las estimaciones de la cantidad de lluvia horaria obtenida de registros de pluviógrafos y otro que representa, las estimaciones de las cantidades obtenidas a partir de las observaciones de radar para los correspondientes sitios de los pluviógrafos y en el mismo intervalo de tiempo .

Los datos de los registros son fijos y no pueden ser cambiados debido a que son los datos base para la calibración. Contrariamente, el segundo conjunto de datos puede ser cambiado alterando la relación I-Z usada para determinar la intensidad de lluvia a partir de los factores de reflectividad del radar.

En esencia, el procedimiento de optimización es alterar repetidamente la relación para mejorar la concordancia de la cantidad de lluvia de los dos conjuntos de datos.

El procedimiento de la técnica de optimización se basa en considerar una función que relaciona las dos variables y hacer una conje-

tura inicial con los parámetros de la relación. Las cantidades -- calculadas en base a la relación son comparadas con los datos ob-- servados y los parámetros son ajustados para mejorar la concordancia entre las cantidades observadas y calculadas. El grado de con-- cordancia es expresado en términos de una función de criterio pre-- seleccionada CTF (definida en el párrafo 5.2.1). El programa de - computadora utilizado busca un valor óptimo (máximo o mínimo depen-- diendo de como este definida la CTF) para la función de criterio.- El programa termina cuando no es posible ajustar los parámetros -- para mejorar significativamente la CTF, esto es, cuando CTF alcan-- za su valor mínimo (ó máximo).

La técnica ajusta todos los parámetros simultaneamente y converge_ absolutamente al mínimo o máximo de la función. Los valores ópti-- mos de los parámetros dependen del número de puntos-dato disponi-- bles, para pequeñas muestras de datos el óptimo alcanzado puede -- dar valores poco confiables.

La función inicial considerada de I-Z es una variación de la ecua-- ción (5.5) dada por:

$$\log (I/R_0) = \log (R_z/R_0) + \frac{1}{b} \log (Z/Z_0) + \gamma (\log (Z/Z_0))^2 \quad (5.7)$$

Los parámetros ajustados por el programa de optimización son $R_z, b,$ y γ , mientras que R_0 y Z_0 son valores de referencia arbitrarios -- que toman valores de $1 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ y $1 \text{ mm}^6 \cdot \text{m}^3$ respectivamente. Con $\gamma=0$ la ecuación (5.7) corresponde a la relación de potencia -- convencional Z-I dada por:

$$(Z/Z_0) = R_z^{-b} (I)^b$$

siendo la relación mas conocida:

$$Z = 200 I^{1.6}$$

El término de segundo orden en la ecuación (5.7) propociona la posi-- ble curvatura de la relación I-Z cuando las variables son dibujadas en papel log-log. Esta curvatura puede ser necesaria para represen-- tar la presencia de granizo frecuentemente encontrado en tormentas_ convectivas, incrementando los factores de reflectividad sin incre-- mentos correspondientes de intensidades de precipitación.

La operación de la técnica de optimización puede explicarse más fácilmente con las gráficas de la Figura V.12.

La grafica de la Figura V.12a, muestra la relación I-Z en la cual - los valores de I son los que varían continuamente en el programa de optimización según muestra la flecha, hasta llegar a la relación óptima. Todos los puntos-datos del valor de I aparecen en la Figura V.12b comparando las estimaciones de radar y pluviógrafo de varias cantidades de lluvia horaria. Como la relación I-Z cambia, los puntos en la segunda gráfica se mueven y la optimización causa que el movimiento sea de tal manera que minimice la función de criterio.

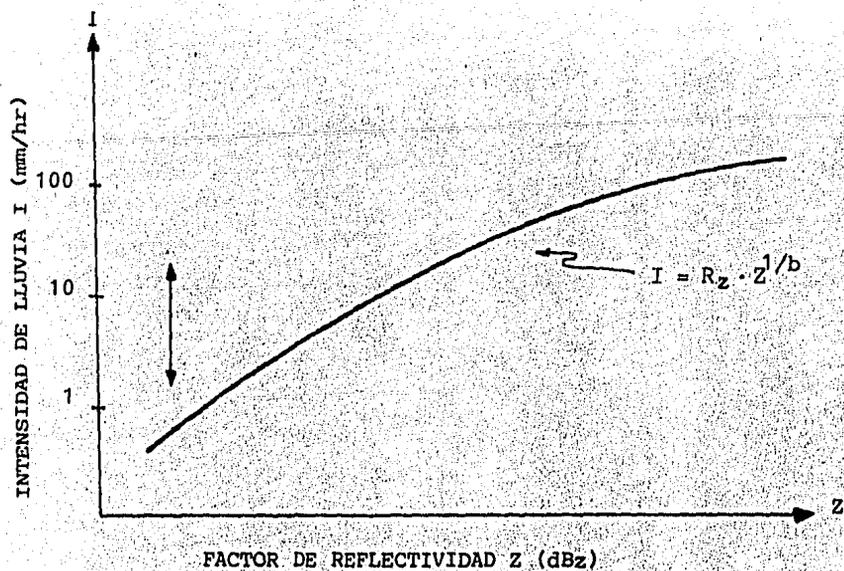
Los puntos datos pueden moverse solamente en la dirección horizontal. Esto es, las estimaciones de pluviógrafos (la ordenada, Figura V.12b) son fijas y solamente las estimaciones de radar cambian - conforme la relación I-Z es variada. El objetivo ideal sería encontrar una relación I-Z que moviera todos los puntos a lo largo de la línea 1:1 donde los dos tipos de estimaciones de lluvia concuerden exactamente.

5.2.1 FUNCIONES DE CRITERIO (CTF)

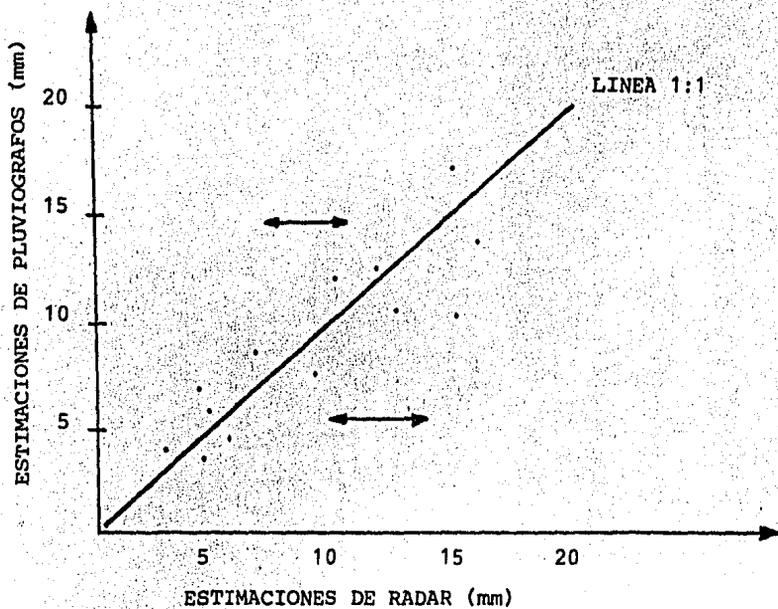
Las estimaciones de radar de acumulaciones de lluvia horaria A_i en cada sitio de pluviógrafo fueron determinadas por medio de la integración de las intensidades de lluvia de radar obtenidas de la ecuación (5.6) en un determinado período de interés. Estas estimaciones fueron comparadas con las correspondientes estimaciones de pluviógrafos G_i (el subíndice "i" indica eventos individuales horarios). La función de criterio CTF para el programa de optimización fue expresada en términos de dichos residuos. Sin embargo, hubo que estudiar varias alternativas para encontrar la óptima a causa de que -- producian variaciones provocando que las medias de las estimaciones de radar fueran mucho menores que las medias de las estimaciones de pluviógrafos. La Tabla V.7 muestra las diferentes funciones utilizadas, de las cuales la siguiente función fue la óptima:

$$CTF = \min \left\{ \sum (A_i - G_i)^2 + / A - G / \right\}$$

Las medias de las estimaciones estuvieron mas concordantes y simultaneamente redujeron los residuos.



(a)



(b)

FIGURA V.12 (a) VARIACIONES EN LA RELACION I-Z. (b) COMPARACION DE ESTIMACIONES DE RADAR Y PLUVIOGRAFO DE CANTIDADES DE LLUVIA HORARIA. VARIACIONES PARA AJUSTAR A LA LINEA 1:1.

TABLA V. 7

FUNCIONES DE CRITERIO CTF

CTF	\bar{G}_A	\bar{A}_G	PROPIEDADES
$\min \left\{ \sum (A_i - G_i)^2 \right\}$	0.937	0.494	Variaciones a la izquierda de la línea A - G
$\min \left\{ \sum \frac{(A_i - G_i)^2}{\sqrt{A_i}} \right\}$	0.826	0.560	Balance cercano
$\min \left\{ \sum \frac{(A_i - G_i)^2}{A_i} \right\}$	0.741	0.618	Variaciones a la derecha de la línea A - G
$\min \left\{ \sum \frac{(A_i - G_i)^2}{A_i^2} \right\}$	0.699	0.546	Mayores variaciones a la derecha de la línea A=G
$\min \left\{ \sum (A_i - G_i)^2 + \left \bar{A} - \bar{G} \right \right\}$	0.90	0.510	$\bar{A} = \bar{G}$, minimiza la varianza.

C A P I T U L O VI

PROCESAMIENTO AUTOMATICO DE LOS DATOS DE RADAR METEOROLOGICO

1. INTRODUCCION

El volumen de información generado por un sistema de radar es muy grande, tanto que es imposible obtener un registro completo del mismo manualmente. Considerando la gran variabilidad de los ecos de precipitación tanto en espacio como en tiempo, siempre ha sido una limitante de la precisión de los radares como instrumentos para medir la intensidad de la precipitación, la cantidad de información que puede ser registrada y analizada manualmente. Sin embargo, dicha limitación se ha visto drásticamente superada por la posibilidad de utilizar equipos de computación digital para almacenar, procesar y presentar en diversos formatos los ecos de precipitación. Conforme los costos de los equipos de computación digital disminuyen cada vez mas, su utilización como parte integral de los sistemas de radar meteorológico se hace mas común, llegando a ser un instrumento indispensable e insustituible para ciertas aplicaciones.

Como en la mayoría de los casos en los cuales se involucra el uso de computadoras para el procesamiento de información, la principal dificultad para su utilización no es su integración física o electrónica al sistema, sino el desarrollo de los programas requeridos para la adecuada ejecución de las funciones de proceso.

2. CONFIGURACION FISICA DEL SISTEMA

En la selección del equipo de computación se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- Velocidad de transferencia de datos a la memoria.
- La capacidad de memoria.
- Sistema operativo.
- Los perifericos disponibles para el sistema.

Considerando las limitaciones de tipo económico y físico del equipo,

resulta impráctico el uso de un sistema de computación de gran capacidad de transferencia de datos, por lo que es necesario llegar a un compromiso entre la velocidad del equipo y la cantidad de datos que serán procesados.

Igualmente, la capacidad de memoria deberá ser determinada en función del volumen total de información que deberá ser almacenada en forma continua, puesto que dada la rapidez con la cual se genera la información, no es posible su transferencia directa a un disco o cinta magnética sino que tiene que ser almacenada en la memoria de la máquina para su transferencia posterior cuando se haya completado un ciclo de "exploración del radar".

El sistema operativo del equipo de cómputo debe estar configurado para manejo de datos en tiempo real, para el proceso de programas en lenguajes de alto nivel y la facilidad para la programación de manera sencilla en lenguaje MACRO. También debe ser configurable para el manejo de diversos periféricos incluyendo monitores de video a color y graficadores de alta resolución.

El sistema de cómputo adecuado debe ser capaz de manejar los siguientes periféricos: Discos magnéticos, cintas magnéticas, impresoras, monitores de video a color y graficadores. La capacidad de almacenamiento de los discos y las cintas también está sujeta a consideraciones de tipo económico, sin embargo, una capacidad total en disco de 10 Mb y de 23 Mb en cinta resulta adecuado para la mayoría de las aplicaciones. La resolución de los monitores de video y de los graficadores también debe ser seleccionada tomando en cuenta el costo de los equipos y la aplicación que se le dará a la información.

La Figura VI.1 muestra el diagrama de bloques de un sistema de procesamiento automático de datos de radar. Mediante una adecuada programación, éste sistema debe ser capaz de llevar a cabo las siguientes funciones:

- Recibir los datos digitalizados del radar hasta 230 - Km en intervalos de 1 Km de longitud y de 1° de ancho cada 360°.
- Crear en disco un archivo con los datos de 25 exploraciones.

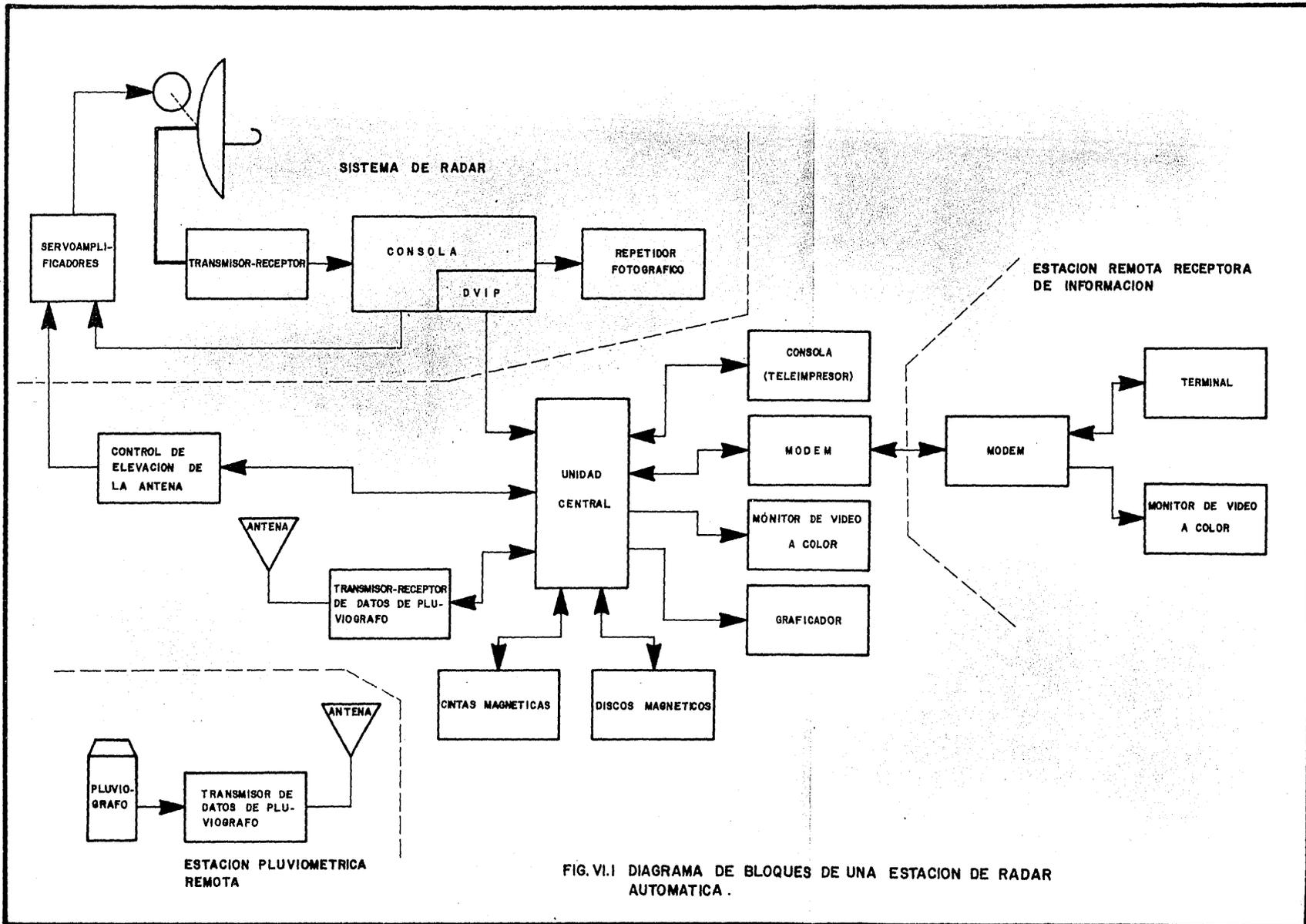


FIG. VI.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UNA ESTACION DE RADAR AUTOMÁTICA.

ciones en azimut, cada una a un ángulo de elevación - diferente.

- Corregir la información por el efecto de distancia y por curvatura de la tierra.
- Corregir la intensidad de los ecos por la presencia de ecos fijos o de suelo según se desee.
- Procesar los datos para el desarrollo de mapas de intensidad de los ecos a una altura constante.
- Procesar los datos para obtener cortes verticales de los ecos en la dirección que se desee (no necesariamente radial).
- Presentar mapas de altura máxima de los ecos.
- Interrogar a uno o más pluviógrafos mediante telemetría, con fines de calibración en tiempo real.

Adicionalmente, el mismo equipo podría realizar otras funciones, dependiendo de la aplicación de la información, tales como:

- Presentar los mapas de intensidad de los ecos, o de intensidad de precipitación en un monitor de video a color de alta resolución.
- Extrapolar en tiempo y espacio con fines de pronóstico. Es decir, determinar un campo de ecos recibidos para obtener un mapa de intensidades que presente la posición estimada de los ecos con una cierta anticipación.

Por último, el control del movimiento de la antena, tanto horizontal como vertical, puede efectuarse bajo el control directo de la unidad de proceso o mediante la utilización de un controlador externo, diseñado específicamente para realizar los cambios de posición de la antena en un patrón preestablecido.

3. PROCESO DE DATOS

3.1 VOLUMEN DE INFORMACION

La digitalización de los datos de radar, es el primer paso para su manejo mediante computadora. Los métodos de digitalización se describieron en el Capítulo III.2.4. Como se mencionó, el DVIP digitaliza e integra (promedia) la información contenida en la señal de video sobre la reflectividad del blanco y produce una palabra de 8 bits para cada incremento en distancia de 1 ó 2 Km según se seleccione en el panel frontal del equipo. Igualmente, esta palabra de 8 bits es el resultado de la integración en tiempo durante 15 ó 31 pulsos de radar, aunque la información se presenta de pulso a pulso.

La información generada por el DVIP, en su formato digital, es alimentada a la computadora para su registro durante una rotación completa de la antena a una elevación constante y generalmente durante 25 elevaciones diferentes de la antena para completar lo que aquí se denomina una "Exploración Volumétrica" creando igualmente un archivo de datos en disco, a partir del cual se obtendrá la información para generar los diversos productos que se describirán mas adelante.

Considerando que solamente los datos correspondientes a una distancia máxima de 230 Km serán almacenados y procesados por la computadora y que la frecuencia de repetición de los pulsos sea de 252 pps, se tendría que para un giro completo de la antena a 3 rpm (20 seg para 360°), el barrido estaría compuesto por un total de 5040 pulsos conteniendo cada uno 230 palabras de 8 bits o sea un total de 1.16 Mbytes por rotación de la antena. Si se consideran 25 rotaciones a diferentes ángulos de elevación de la antena el volumen total de información sería de 29 Mb.

Sin embargo, éste volumen total de datos contiene mucha información redundante, aparte del hecho de que sería costoso en extremo crear archivos de datos de tal magnitud, por lo que se desecha toda la información redundante y se establecen diversos formatos para el almacenamiento de los datos que permitan un aprovechamiento racional -- del espacio de los archivos en disco.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el patrón de radiación de una antena parabólica circular se representa mediante el ángulo sólido de apertura θ o sea el ancho del haz. Dicho ángulo sólido constituye el espacio que es muestreado cada vez que el sistema de radar emite y recibe los ecos producidos por cada pulso. Por lo tanto, si el ancho del haz es de 1.5° , sólo es necesario registrar información correspondiente a incrementos en azimut de 1.5° , ó sea, únicamente 240 radiales durante una rotación completa de la antena. Es decir, una vez cada 21 pulsos transmitidos por el sistema, siempre que la frecuencia de repetición sea de 252 pps y la velocidad de rotación de la antena de una vuelta cada 20 seg ($18^\circ/\text{seg}$).

Si el ancho del haz se reduce a 1° y el resto de los parámetros no cambia (252 pps y $18^\circ/\text{seg}$) sería necesario obtener información una vez cada 14 pulsos transmitidos por el radar o sea 360 radiales en una rotación completa.

Si se registran 240 radiales en una rotación completa, el volumen total de datos para 230 km sería de 55 Kb (240×230) y de 1.4 Mb para 25 rotaciones. Sin embargo, conforme aumenta el ángulo de elevación de la antena, se reduce la distancia máxima a la cual conviene registrar la información dependiendo dicha distancia de la altura máxima a la cual se desean obtener datos. Si la altura máxima se limita a 30 Km y el ángulo de elevación se incrementa de 0° a 37.5° en pasos de 1.5° , a partir de 7.5° de elevación no es necesario registrar datos hasta 230 Km sino únicamente los que alcancen una altura de 30 Km (Tabla VI.1), reduciéndose el volumen de datos a 0.8 Mb para las 25 rotaciones completas. Este constituye el volumen total de la información digitalizada que configura una exploración volumétrica, sin embargo, la memoria principal de la computadora sólo se utiliza para almacenar los datos de una sola rotación ya que durante el tiempo invertido por la antena para cambiar de elevación, los datos registrados en memoria se transfieren al disco magnético, utilizando, para ahorrar espacio un formato de registro de supresión de ceros mediante el cual se eliminan secuencias fijas de datos con valor constante por debajo de un umbral de detección arbitrario y conservándose sólo aquellas que contienen valores por

TABLA VI.1

DISTANCIAS DE RADAR A LAS QUE SE ALCANZA 30 KM
DE ALTITUD

ELEVACION (Grados)	DISTANCIA (Km)	ALTURA (Km)	ELEVACION (Grados)	DISTANCIA (Km)	ALTURA (Km)
0	642	29.9	5	642	29.9
1	525	30.07	57	532	29.93
2	434	30.01	67	520	29.91
3	364	30	77	508	30.03
4	310	29.95	89	502	29.94
5	270	30.13	1.04	576	30.02
6	236	29.95	1.2	556	29.91
7	210	29.95	1.39	536	29.98
8	190	30.18	1.61	514	30.05
9	172	30.08	1.87	488	29.96
10	158	30.21	2.16	462	30.04
11	146	30.31	2.51	432	29.9
12	134	30.01	2.9	404	30.08
13	126	30.29	3.36	372	29.97
14	118	30.31	3.89	340	29.9
15	110	30.05	4.51	310	30.03
16	104	30.12	5.22	280	30.09
17	96	29.98	6.05	250	30
18	94	30.29	7.01	222	29.95
19	90	30.46	8.11	198	30.22
20	86	30.5	9.4	174	30.15
21	82	30.39	10.88	152	30.01
22	78	30.15	12.6	134	30.25
23	76	30.59	14.59	116	29.97
24	72	30.11	16.9	102	30.21
25	70	30.37			

LA TABLA DE LA IZQUIERDA MUESTRA LAS DISTANCIAS DE RADAR QUE ALCANZAN LOS 30 KM CON VARIACIONES LINEALES DE LA ELEVACION DE LA ANTENA. LA TABLA DE LA DERECHA LISTA LAS DISTANCIAS PERO CON VARIACIONES NO LINEALES DE LA ELEVACION DE LA ANTENA.

encima de dicho umbral, acompañadas éstas secuencias por los datos necesarios para definir su localización dentro del tren de datos correspondiente al pulso de que se trate. De esta manera se obtiene una considerable reducción de la longitud del archivo en disco, en la mayor parte de las situaciones meteorológicas. El archivo de datos deberá contener además, toda la información necesaria para determinar la posición de los datos de reflectividad detectados por el radar tales como ángulos de azimut y elevación así como la hora de registro de cada rotación.

La transferencia de datos de radar a la memoria de la computadora constituye la tarea única y principal de la máquina, quedando en segundo grado el resto de los procesos.

3.2 CONVERSION DE COORDENADAS

La mayoría de los dispositivos de presentación de la información utilizados para la computadora (impresoras, pantallas de video y graficadores) requieren para su utilización, en el despliegue de datos de radar, que se efectue un cambio de coordenadas del formato típico del radar (coordenadas polares) al de coordenadas cartesianas o rectangulares. Dicha transformación requiere de la selección de una rejilla rectangular uniforme que sea utilizada como base para la presentación de los datos. Considerando que la información de radar tal y como se recibe del DVIP no es de densidad uniforme (Figura VI.2) es necesario que paralelamente con la transformación de coordenadas se someta la información a un esquema de interpolación, para grandes distancias y de eliminación de información para distancias cortas. Por lo tanto, si el intervalo angular de la información es de 1.5° , se utiliza una rejilla de 2×2 Km, mientras que para un intervalo de 1° la rejilla puede ser de 1×1 Km.

Si bien el algoritmo básico para el cambio de coordenadas es en esencia el convencional, es decir basado en las ecuaciones (6.1) y (6.2), es necesario efectuar una interpolación lineal entre los cuatro valores de intensidad del eco que circundan al punto de la rejilla de que se trate. En el caso de información sobrante para los -

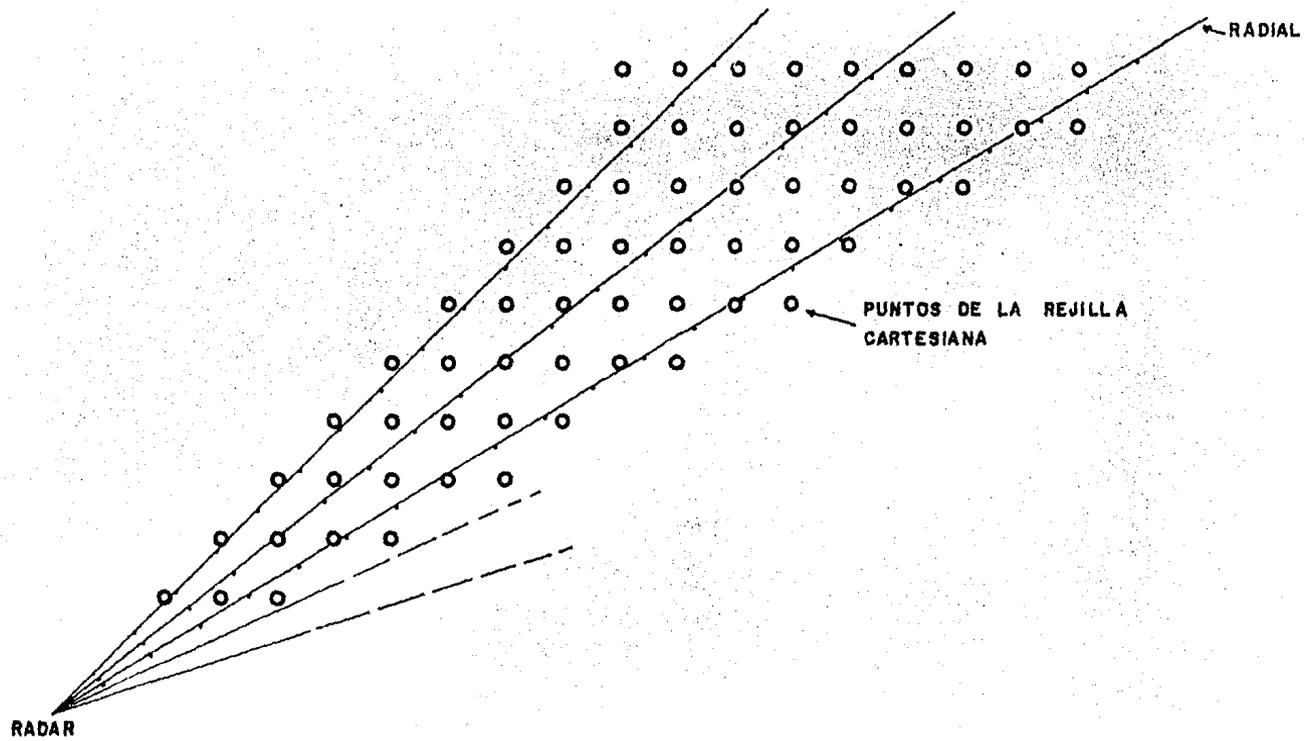


FIG.VI.2 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA DENSIDAD NO UNIFORME AL CONVERTIR COORDENADAS POLARES A RECTANGULARES.

$$X_i = R_i \cdot \text{sen } \varphi \quad (6.1)$$

$$Y_i = R_i \cdot \text{cos } \varphi \quad (6.2)$$

en donde:

$X_i - Y_i$ - Coordenadas rectangulares.

R_i - Distancia del radar.

φ - Angulo de azimut

puntos de la rejilla cercanos al radar se conserva el valor máximo de intensidad y se lo asigna al punto correspondiente.

3.3 MAPAS DE INTENSIDAD A ALTITUD CONSTANTE (CAPPI)

Uno de los principales productos del proceso digital de datos de radar, son los mapas de intensidad a altitud constante en un formato similar al de una pantalla PPI por lo que comunmente se les denomina CAPPI (Constant Altitude PPI).

Dichos mapas se obtienen a partir del archivo de datos correspondiente a la exploración volumétrica, seleccionando para cada elevación aquellos datos (kilómetros) que contienen la información acerca de la capa de altitud constante que se va a imprimir o presentar en un monitor de video (Figura VI.3). La capa de altitud constante se define con su base y su tope, es decir con dos alturas umbral -- Z_1 y Z_2 siendo muy común que el espesor de la capa sea de 1 Km o -- sea $Z_2 - Z_1 = 1$.

El CAPPI normalmente se genera utilizando tablas previamente calculadas de los kilómetros de cada elevación que aportan datos sobre la capa en cuestión. Estas tablas se conservan en archivos en disco magnético. Un ejemplo de un mapa CAPPI se presenta en la Figura VI.4. Los números representan la intensidad del eco en una área de 3 x 5.5 Km.

Los mapas CAPPI se presentan también en monitores de video a color, asignándole a cada nivel de intensidad un color. La cantidad de ni-

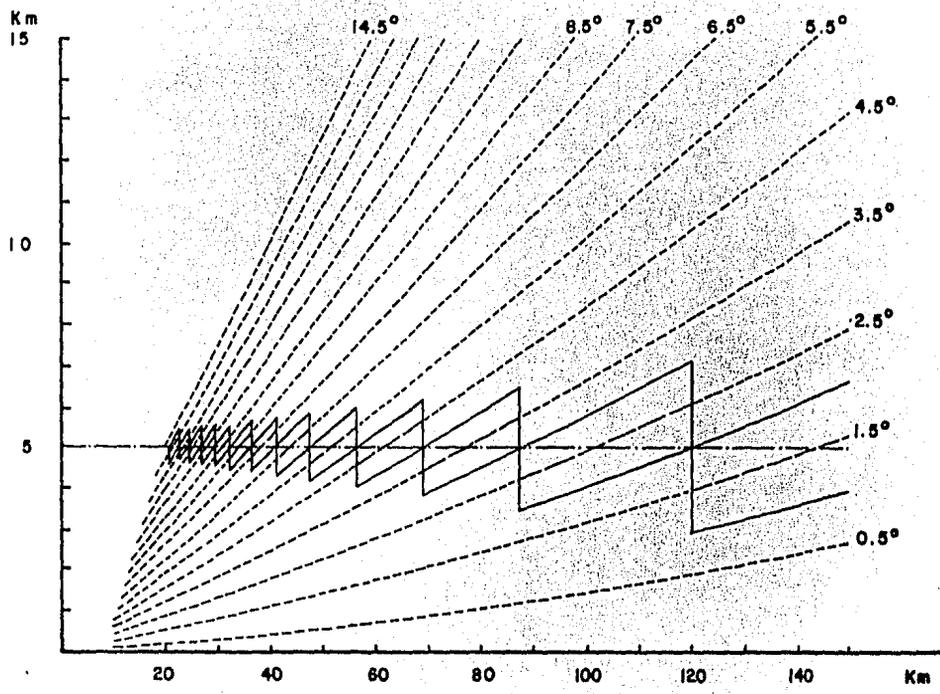


FIG.VI.3 SEGMENTOS HORIZONTALES QUE CONFIGURAN EL CAPPI.

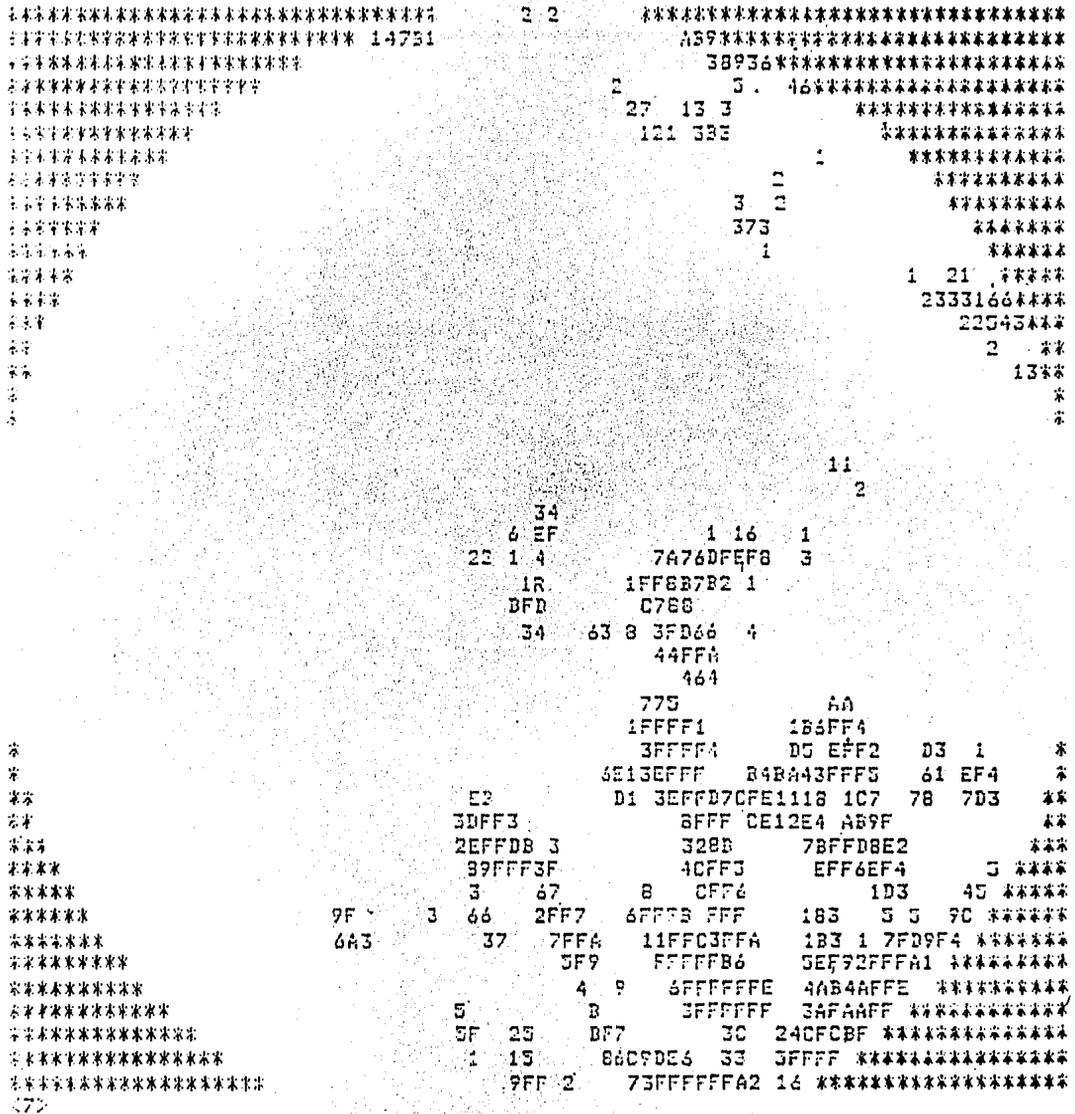


FIGURA VI.4 MAPA CAPP1 A 1.5 KM.

CADA UNO DE LOS CARACTERES REPRESENTA LA INTENSIDAD DE ECO EN EL CUADRO DE 3 x 5.5 Km. SE MUESTRAN 15 NIVELES DE INTENSIDAD:

1, 2, 9, A, B, F.

veles (colores) y la densidad de la rejilla dependerán de la resolución máxima del monitor. Si ésta es de 256 x 256 pixeles, se puede presentar una imagen de 16 niveles con una rejilla de 2 x 2 Km a una distancia máxima de 230 Km, utilizando una memoria de 256 x 256 por 4 bits para cada pixel.

Las tablas para la generación del CAPPI se calculan utilizando la ecuación (2.4) del Capítulo II, obteniéndose valores de altura corregidos por los efectos de la curvatura terrestre y por la propagación en la atmósfera estandar.

Hasta este punto se ha considerado que para ejecutar una exploración volumétrica, el cambio del ángulo de elevación de la antena se hace linealmente, es decir:

$$E = E_0 + A_e \cdot n$$

en donde E_0 es el ángulo de elevación inicial, A_e es un incremento fijo y $n = 0, 1, 2, \dots$. Sin embargo se obtienen ciertas ventajas en la generación de los CAPPI si se adopta un patrón de cambio no lineal del ángulo de elevación de la antena como por ejemplo:

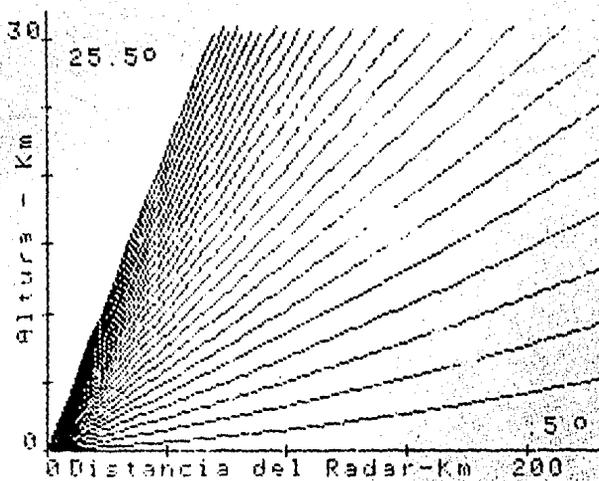
$$E = E_0 \cdot G^n$$

donde E_0 es el ángulo de elevación inicial, normalmente igual a 0.5° , G es un factor de incremento y generalmente se le asigna un valor de 1.158 y $n = 0, 1, 2, \dots$. Utilizando los valores anteriores se obtiene una gráfica de elevaciones mostrada en la Figura VI.5 hasta un ángulo de 37.5° ó $n=25$.

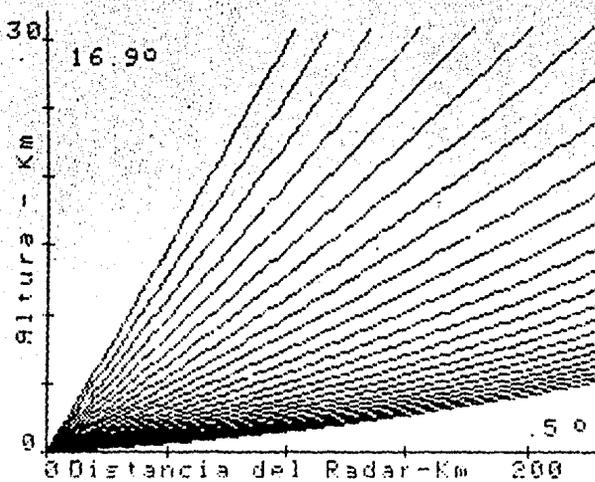
Se ha demostrado una relación de altura similar al patrón de elevaciones anteriormente descrito, dada por:

$$H = H_0 \cdot G^n$$

siendo H la altura y H_0 una altura inicial. Para cada altura que se desee, se puede dibujar en la gráfica una línea horizontal tal que -- sus intercepciones con los diferentes trazos del eje del haz del radar a las diferentes elevaciones, ocurren a distancias que se incrementan en progresión geométrica tales que:



a) VARIACIONES LINEALES DEL ANGULO DE ELEVACION.



b) VARIACIONES NO LINEALES DEL ANGULO DE ELEVACION.

FIGURA VI.5 HAZ DEL RADAR A DIFERENTES ANGULOS DE ELEVACION.

$$R = R_0 \cdot G^n$$

Lo anterior da como resultado una generación del CAPPI más rápida y uniforme.

3.4 MAPAS DE ALTURA MÁXIMA DE ECOS

Como en el caso de la generación del CAPPI, los datos que constituyen el archivo de la exploración volumétrica pueden ser procesados y analizados para presentar en el mismo formato PPI un mapa de la altura máxima de los ecos dentro de cada cuadro de la rejilla básica.

Esto se consigue analizando radialmente los datos contenidos en cada kilómetro que se encuentren en una línea vertical, cuando el valor dentro del kilómetro sea inferior al umbral especificado, se considerará al anterior como la cima del eco calculándose su altitud mediante el uso de las ecuaciones desarrolladas en el punto 6.11 del Capítulo II. Con la información de la altitud así obtenida se genera un mapa en coordenadas rectangulares, haciendo la correspondiente transformación e interpolación de datos.

4. DETERMINACION DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACION

Los datos de radar almacenados en disco son datos de reflectividad de los blancos. Esta información puede ser presentada en términos de unidades de reflectividad propiamente (dBz) o en términos de intensidad de lluvia mediante la aplicación de la relación Z-I adecuada.

Para obtener valores de Z a partir de los datos digitalizados de la señal de video, se utiliza una tabla de valores DVIP contra valores de Z en dBz, obtenida a partir de la medición de la señal mínima discernible del receptor y de la respuesta y ajuste del DVIP a una señal de potencia conocida e inyectada al receptor en varios pasos de magnitud. Este procedimiento es similar al de la calibración del DVIP, descrita en el Capítulo V.2, para el ajuste de los seis niveles DVIP de intensidad de precipitación, aunque para el caso de un sistema computarizado se manejan mas niveles, comunmente 64.

Anteriormente, se explicaron los procedimientos que se siguen para la determinación de las relaciones Z-I y para la "Calibración" del radar con respecto a una red de pluviógrafos. El uso de una computadora para el manejo de datos de radar permite efectuar los cálculos de calibración con mayor exactitud por un lado, y por el otro con -- frecuencia se utilizan pluviógrafos que son interrogados telemétrica mente desde la estación de Radar, obteniéndose un dato casi simulta neo con la información de radar, lo que permite el cálculo de facto res de calibración que proporcionan un mapa de intensidad de precipi tación de gran exactitud.

La información de pluviógrafos obtenida por telemetría, reduce la de pendencia de la información sobre la intensidad de precipitación ob tenida de los datos de reflectividad, de los parámetros de la rela--- ción Z-I, haciendo menos crítica la selección o cálculo de dichos pa rámetros.

Adicionalmente, se pueden obtener acumulaciones de lluvia en diferen tes períodos que son aplicados a diversos modelos de comportamiento hidrológico de las cuencas contenidas dentro de la cobertura del ra dar, obteniéndose así información de gran utilidad para el manejo de dichas cuencas en diversos aspectos.

El cálculo de los valores de la intensidad de precipitación, a par-- tir de los datos digitalizados de reflectividad constituye una de - las muchas aplicaciones que se le puede dar a la información de ra-- dar registrada mediante computadora, ya que al contar con un archivo de datos, éstos pueden aplicarse a una gran variedad de modelos numé ricos en los que se cuentan los siguientes:

- Pronósticos de trayectoria de ecos.
- Cuantificación de los volúmenes de agua.
- Pronósticos de intensidades y volúmenes de precipita-- ción.
- Pronósticos de escurrimiento en cuencas hidrológicas.
- Calibración de imágenes de satélite meteorológico.

- Presentación de información meteorológica para el control de tráfico aéreo.
- Análisis y trazo de mapas de vientos obtenidos a partir de la señal de un radar Doppler.

El uso de computadoras para el control y registro de la información obtenida mediante los radares meteorológicos, permitió hacer de los radares una de las herramientas de observación meteorológica más poderosas con las que actualmente se cuenta. Sus aplicaciones se amplían y consolidan cada vez más habiéndose llegado a considerar como una herramienta indispensable para los análisis de fenómenos meteorológicos de escala media, tanto en actividades de tipo operacional como de investigación. Continuamente se abren nuevas posibilidades de aplicación de los radares o se alcanzan mayores niveles de exactitud de los ya establecidos. El desarrollo de programas para el manejo de los datos de radar se hace con gran rapidez y los avances en la tecnología de microprocesadores permite suponer que el manejo digital de la información de radar será aplicado universalmente.

APENDICE A

TEORIA ELEMENTAL DE MUESTREO

La teoría de muestreo es el estudio de la relación existente entre una población y las muestras sacadas de esa población.

A las cantidades obtenidas de la población se les llama parámetros de la población, tales como Media μ , Desviación estándar σ , Varianza σ^2 , etc. y a las cantidades obtenidas de las muestras se les nombra estadísticos: Media \bar{x} , Desviación estándar s , Varianza s^2 , etc.

Con la teoría de muestreo se puede inferir la información acerca de la población a partir de los estadísticos de las muestras de dicha población, es decir, a partir de las muestras de tamaño N obtenidas de la población se determinan los estadísticos que permiten obtener las distribuciones de muestreo. La figura A1 resume lo anterior.

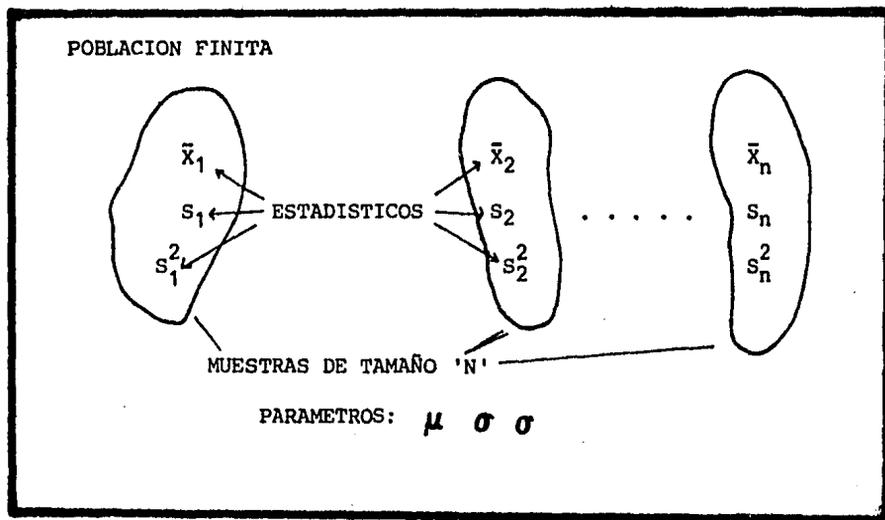


FIGURA A1. ESQUEMA QUE MUESTRA LOS PARAMETROS DE UNA POBLACION Y LOS ESTADISTICOS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS DE LA POBLACION.

A partir de los estadísticos de las muestras se puede obtener las distribuciones de muestreo definidas como:

DISTRIBUCION DE MEDIAS

$$\mu_{\bar{x}} = \mu$$

$$\mu_s = \sqrt{\frac{N-1}{N}} \sigma$$

$$\mu_{s^2} = \frac{N-1}{N} \sigma^2$$

donde:

$\mu_{\bar{x}}$ = Media de las medias de las muestras

μ_s = Media de las desviaciones de las muestras

μ_{s^2} = Media de las varianzas de las muestras.

DISTRIBUCION DE DESVIACIONES ESTANDAR

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{N_p - N}{N_p - 1}}$$

Población finita
 N_p - Tamaño de la población.

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Población infinita.

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{\sqrt{2N}}$$

$$\sigma_{s^2} = \sigma^2 \sqrt{\frac{2}{N}}$$

donde:

$\sigma_{\bar{x}}$ = Desviación de las medias de las muestras

σ_s = Desviación de las desviaciones de las muestras

σ_{s^2} = Desviación de las varianzas de las muestras.

APENDICE B

DEFINICION GENERAL DE LA FUNCION GAMMA

La Función Gamma $\Gamma(z)$ se define como sigue:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (1)$$

y

$$\Gamma(z) = k^z \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-kt} dt \quad (2)$$

El valor de la función está dado por:

$$\Gamma(n+1) = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n+1) \cdot n = n! \quad (3)$$

$$\Gamma(n+1/2) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2^n} \Gamma(1/2) \quad (4)$$

$$\Gamma(1/2) = \pi^{1/2} = 1.7724 \quad (5)$$

$$\Gamma(z) = \Gamma(n+1) \quad (6)$$

Para los casos particulares referenciados, la ecuación (3.3) esta dada por:

$$z = N_0 \int_0^{\infty} e^{-\Lambda D} D^6 dD$$

Haciendo analogia con (2)

$$k = \Lambda$$

$$z-1 = 6$$

$$z = 6$$

Relacionando con (6):

$$\Gamma(z) = \Gamma(n+1) = \Gamma(7) = 6!$$

$$\Gamma(7) = 720$$

Finalmente:

$$z = \frac{\Gamma(7)}{\Lambda^7} = \int_0^{\infty} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD$$

Por otro lado, para la ecuación (3.6)

$$I = N_0 \left(\frac{\pi \rho}{6} \right) (130) \int_0^{\infty} D^{7/2} e^{-\Lambda D} dD$$

Haciendo analogía con (2):

$$K = \Lambda$$

$$z-1 = 7/2$$

$$z = 9/2 = 4 + 1/2$$

Sustituyendo en (4):

$$\Gamma(4+1/2) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7}{2^4} \Gamma(1/2)$$

$$\Gamma(9/2) = \frac{105}{16} \pi^{1/2}$$

Finalmente:

$$\frac{\Gamma(9/2)}{\Lambda^{9/2}} = \int_0^{\infty} D^{7/2} e^{-\Lambda D} dD$$

o bien:

$$I = N_0 \left(\frac{\pi \rho}{6} \right) (130) \frac{\Gamma(9/2)}{\Lambda^{9/2}}$$

APENDICE C

CARACTERISTICAS TECNICAS DEL RADAR WSR-74 BANDA C

UNIDAD DE TRANSMISOR-RECEPTOR

Frecuencia:	Sintonizable de 5600 a 5625 MHz
Potencia pico de salida:	250 Kw a la salida del transmisor-Receptor.
Tipo de magnetrón:	SFD 373
Ancho del pulso:	3.0 microsegundos.
PRF:	266, +0, -10 pps
Receptor:	Logarítmico
Rango dinámico del receptor:	80 dB mínimo
Ancho de banda del receptor:	0.5, -0, + 0.25 MHz
Frecuencia intermedia del receptor:	30 MHz.

MOVIMIENTO DE LA ANTENA

Tipo:	Elevación y Azimut
En azimut:	360 grados contínuos
En elevación:	de -1 a +60 grados

ANTENA PARABOLICA

Tipo:	Parabólica con cuerno
Diámetro:	2.43 mts de diámetro
Polarización:	Lineal, horizontal
Ganancia:	40 dB mínimo
Ancho del haz:	1.65 grados.

INDICADORES

Pantalla PPI

Tamaño: 30.48 cm de diámetro
Distancias del barrido: 100, 230 y 450 km
Marcas de distancia: 20, 50 y 100 km.
Cursor de distancia: Variable de 0 a 450 km.

Pantalla RHI

Tamaño: Cuadrada de 30.48 X 30.48 cm.
Distancias del barrido: 100, 230 y 450 km.
Marcas de distancia: 20, 50 y 100 km.
Altura: 21 km.
Marcas de altura: Cada 5 km con marcas en cada km.
Presentación del haz: De 0 a +60 grados.
Cursor de distancia: Variable de 0 a 450 km.

Pantalla del Indicador A

Tamaño: Rectangular de 10.1 X 127 cm
Distancias del barrido: 100, 230 y 450 km.
Marcas de distancia: 20, 50 y 100 km.
Cursor de distancia: Variable de 0 a 450 km.

B I B L I O G R A F I A

CAPITULO I

- Electronics. Vol. 53. No 9. Abril 1980.

CAPITULO II

- Introduction to Weather Radar. National Oceanic and Atmospheric Administration. March 1974.
- Weather Radar Manual. National Oceanic and Atmospheric Administration. August 1967.
- Radar Observation of the Atmosphere. Louis J. Battan. Univ. of Chicago Press.
- Ultra High Frequency Propagation. Henry R. Reed and Carl M. Russell. Ed Science Paperbaks.
- Nota técnica: Deducción de ecuaciones para el cálculo de alturas de ecos de radar y distancias sobre la superficie terrestre, con respecto al radar. SARH, DGSMN, Dpto Red de Radares.
- Radar Handbook. Merril Skolnik. McGraw Hill Company. 1970.
- Introduction to Radar Systems. Merrill I. Skolnik. McGraw Hill Company 1980.

CAPITULO III

- Meteorological Radar Signal Intensity Estimation. Dale Sirmans, R.J. Doviak. NOAA Technical Memorandum. ERL NSSL 64.
- Meteorological Radar System. Instruction Manual. WR100-5/WSR-74C C-BAND.
- McGraw Hill Encyclopedia of Science and Technology. 1971.
- Foundations for Microwave Engineering. R.E. Collin. McGraw Hill Kogakusha 1966.
- Radar Transmitters. George W. Ewell. Ed McGraw Hill Company.

CAPITULO IV

- Radar Measurement of Precipitation Rate. A.M. Borovikov, V.V. Kostarev, I.I. Mazin, V.I. Smirnov and A.A. Chernikov. Israel --

Program for Scientific Translations.

- Radar Meteorology. V.V. Kostarev, A.A. Chernikov and A.B. Shupya tskii. Israel Program for Scientific Translations.
- Nota técnica: Curso de Radar. SARH, DGSMN, Dpto Red de Radares.
- Quantitative Radar Measurements of Precipitation. Kenneth E. -- Wilk and Edwin Kessler. Meteorological Monographs, Vol 11, No 33 pp 315-329, October 1970.

CAPITULO V

- Manual de Mantenimiento del Radar WSR-74C. SARH, DGSMN, Dpto Red de Radares.
- Radar-Rain Gage Precipitation Measurement: A Summary. James W. -- Wilson. Preprints 1st Conference on Hidrometeorology, AMS 1976.
- Comparison of Gage and Radar Methods of Convective Rain Measure-- ments. W.L. Woodley, A.R. Olsen, A. Herndon and V. Wiggert. -- J. Appl. Meteor. 14, 909-929, 1975.
- Optimizing Rainfall Estimates with the Aid of Radar. E.A. Bran-- des. J. Appl. Meteor. 14, 1339-1345, 1975.
- A Comparison of Areal Rainfall as Measured by a Rain Gauge-Cali-- brated Radar Systems ans Rain Gauge Networks of Various Densities C.G. Collier, R.W. Harrold and C.A. Nicholass. 16th Radar Meteo-- rology Conf. AM. Meteorology Soc. 467-472, 1975.
- Derivation of an R-Z Relationship by Computer Optimization and -- its use in Measuring Daily Areal Rainfall. P.L. Smith, D.E. Cain and A.S. Dennis. 16th Radar Meteorology Conf. AM. Meteorology - Soc. 461-466.
- Informe General, Estación de Radar Tampico 1982. SARH, DGSMN., - Dpto. Red de Radares.

CAPITULO VI

- Preprints. 15th, 16th, 21th Radar Meteorology Conference. Ameri-- can Meteorological Society. Varios autores.
- Weather Monotoring System. Enterprise Electronics Corp. 1980.