

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION

TESIS DOCTORAL

SOBRE LA MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL
EN LA IONOSFERA, A TRAVES DE LA COMPARACION DE
LA VELOCIDAD DE FASE DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS.

Presentada por FAUSTO MONTOYA VITINI, Ingeniero Superior
de Telecomunicación, Plan de 1.957, para optar al grado de
DOCTOR INGENIERO DE TELECOMUNICACION.

Madrid, 1.970

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION

TESIS DOCTORAL

SOBRE LA MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL
EN LA IONOSFERA, A TRAVES DE LA COMPARACION DE LA
VELOCIDAD DE FASE DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS.

Presentada por FAUSTO MONTOYA VITINI, Ingeniero Superior de Telecomunicación, Plan de 1.957, para optar al grado de DOCTOR INGENIERO DE TELECOMUNICACION.

Dirigida por el Prof. de Investigación Dr. Ingeniero D. FRANCISCO IGLESIAS GARRIDO. Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica del Centro de Investigaciones Físicas "Leonardo Torres Quevedo".

Madrid, 1.970

TESIS SOBRE LA MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL
EN LA IONOSFERA, A TRAVES DE LA COMPARACION DE LA VELO-
CIDAD DE FASE DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS.

I N D I C E

	Pag.
INTRODUCCION.	IX
RECONOCIMIENTO.	XI
CAPITULO 1.- PLANTEAMIENTO GENERAL	
1.1.- ANTECEDENTES	1
1.2.- MEDIDAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, REALIZADAS DESDE EL SUELO MEDIANTE ONDAS ELEC TROMAGNETICAS	2
1.2.1.- Sondeo de la Ionosfera con impulsos electromagnéticos emitidos verticalmente des de el suelo.	2
1.2.2.- Medidas basadas en los cam bios de fase de una onda - electromagnética, emitida desde el suelo, después de ser reflejada por la Ionos	

	Pag.
fera.	4
1.2.3.- Medidas basadas en la cantidad de energía devuelta por la Ionosfera, por dispersión incoherente de una onda de muy alta frecuencia emitida desde el suelo.	5
1.2.4.- Medidas basadas en la observación y estudio de las ondas electromagnéticas de frecuencia audible, generadas por la Atmósfera terrestre, (silbidos).	6
1.3.- MEDIDAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, REALIZADAS DESDE VEHICULOS ESPACIALES.	7
1.3.1.- Medida de las características del Plasma Ionosférico mediante Sondas de Langmuir.	8
1.3.2.- Medida de las características del Plasma Ionosférico mediante Sondas de Radiofrecuencia.	9
1.3.3.- Sondeo de la Ionosfera con impulsos electromagnéticos emitidos verticalmente desde Satélites Artificiales.	10

	Pag.
1.4.- MEDIDAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, REALIZADAS MEDIANTE LA OBSERVACION DE LA PROPAGACION DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS ENTRE EL SUELO Y UN VEHICULO ESPACIAL.	10
1.4.1.- Medidas basadas en la rotación sufrida por el plano de polarización de una onda electromagnética al propagarse entre el suelo y un vehículo espacial.	11
1.4.2.- Medidas basadas en el efecto Doppler dispersivo, sufrido por una onda electromagnética al propagarse entre el suelo y un vehículo espacial.	12
1.4.3.- Medidas basadas en la comparación de velocidades de fase de dos ondas relacionadas armónicamente que se propagan entre un vehículo espacial y el suelo.	13
1.5.- CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE MEDIDA PROPIO.	19
1.5.1.- Propagación en un modo único: iónico.	22

Pag.

- 1.5.2.- Comparación de la velocidad de fase de TRES frecuencias armónicas y determinación de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas. 23
- 1.5.3.- Disposición de los transmisores y receptores. 24
- 1.5.4.- Operación del sistema de medida. 25

CAPITULO 2.- ANALISIS FISICO-MATEMATICO DEL SISTEMA DE MEDIDA PROPIO

- 2.1.- NATURALEZA DE LA IONOSFERA 32
- 2.2.- ESTUDIO DE LAS ECUACIONES DE DISPERSION Y POLARIZACION EN LA IONOSFERA. 33
- 2.2.1.- Aproximaciones casi longitudinal y casi trasversal de las ecuaciones de dispersión y polarización. 37
- 2.2.2.- Deducción del índice de refracción de la Ionosfera en la aproximación casi longitudinal. 41

Pag.

2.3.- MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA EN LA IONOSFERA, A TRAVES DE LA - COMPARACION DE LA VELOCIDAD DE FASE DE TRES ONDAS ELECTROMAGNETICAS, DE FRECUENCIAS ARMONICAS, QUE SE PROPAGAN EN EL MODO IONICO, ENTRE EL SUELO Y UN COHETE SONDA.	43
2.3.1.- Medida del índice de refracción de la Ionosfera, para dos frecuencias diferentes.	45
2.3.2.- Cálculo de la densidad electrónica y frecuencia efectiva de colisión de los electrones con las demás partículas.	49
2.3.3.- Efecto del giro del cohete alrededor de su eje.	52
CAPITULO 3.- PROYECTO Y REALIZACION DEL SISTEMA DE MEDIDA PROPIO	
3.1.- TRASMISION	54
3.1.1.- Cálculo de la Potencia a transmitir.	54
3.1.2.- Oscilador.	56
3.1.3.- Amplificadores y multiplicadores.	58
3.1.4.- Antenas.	59

	Pag.
3.1.5.- Sistema de Control.	63
3.2.- RECEPCION	63
3.2.1.- Disposición general del sistema receptor.	63
3.2.2.- Sensibilidad.	65
3.2.3.- Ancho de banda.	67
3.2.4.- Realización.	67
3.2.5.- Antenas.	68
3.2.6.- Oscilador local.	72
3.2.7.- Multiplicador de la frecuencia del oscilador local.	77
3.2.8.- Divisor de la frecuencia del oscilador local.	79
3.2.9.- Receptor de 80 MHz.	81
3.2.10.- Receptores de 20 MHz y 5 MHz.	83
3.2.11.- Comparador de fase 20 MHz/80 MHz.	86
3.2.12.- Comparador de fase 5 MHz/20 MHz.	86
3.2.13.- Medidor de temperatura.	89
CAPITULO 4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	
4.1.- LANZAMIENTO DEL S 46 del ESRO	92

	Pag.
4.1.1.- Datos del lanzamiento	92
4.1.2.- Datos de la carga de pago	93
4.1.3.- Efecto del giro del cohete alrededor de su eje.	95
4.1.4.- Determinación de la densidad electrónica.	97
4.1.5.- Determinación de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas.	101
CONCLUSIONES.-	104
APENDICE BIBLIOGRAFICO.-	110

INTRODUCCION

La Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE), incluye en su programa de investigación la medida de varias magnitudes físicas de las capas bajas de la Ionosfera. Al Centro de Investigaciones Físicas "Leonardo Torres Quevedo", le ha sido encargado el planteamiento y realización de experimentos destinados a la MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL. Entre ellos figura el descrito en la presente Tesis.

La labor investigadora para el desarrollo del experimento, ha sido llevada a cabo durante los años 1969 y 1970, parte en el CIF "L. Torres Quevedo", de Madrid y parte en el Arbeitsgruppe für Physikalische Weltraumforschung (APW), de Freiburg in Breisgau (República Federal Alemana). La parte experimental, ha incluido el desarrollo de un equipo electrónico parcialmente realizado durante la estancia del autor en el APW.

El sistema total de medida, ha sido utilizado en la base de lanzamiento de cohetes-sonda ESRANGE, que el ESRO tiene instalada en las proximidades de Kiruna -

(Suecia), habiendo confirmado las previsiones del planteamiento teórico y las ventajas de las soluciones experimentales introducidas.

En vista del éxito obtenido con este procedimiento de medida, el APW ha decidido incluirlo en el lanzamiento que tiene previsto para el mes de Febrero de 1971 en la base de KOUROU (Guayana Francesa), figurando el autor como científico responsable del experimento; independientemente del lanzamiento que la CONIE, en combinación con el CIF, piensa llevar a cabo en el invierno 1971-72 en la base de ARENOSILLO (Huelva), perteneciente al INTA ET.

RECONOCIMIENTO

La realización de este trabajo, ha sido posible, gracias a la ayuda prestada al autor por sus superiores y compañeros en el CIF "L. Torres Quevedo" y por los componentes del APW, centro de Investigación Espacial al que agradece las facilidades prestadas.

Debe manifestar su gratitud hacia su director de Tesis, Prof. de Investigación Dr. Ingeniero D. Francisco Iglesias Garrido, por sus valiosas orientaciones y estímulo durante la realización del trabajo.

Al Director del CIF, Prof. de Investigación, Dr. Ingeniero D. Andrés Lara Sáenz, quien decidió la realización del trabajo, por sus recomendaciones y su rotundo apoyo moral y material, tanto durante la estancia del autor en España como en Alemania y Suecia.

Al Dr. Ingeniero D. Juan Antonio Gómez García, por su eficaz guía en el planteo y desarrollo del trabajo, cuando aún se presentaba lleno de dificultades.

Igualmente, debe expresar su gratitud a los -

compañeros del CIF: D. José Ruiz Vera, por su valiosa colaboración en el diseño del equipo de tierra y su realización, D. Tomás Alvarez Martín, D. Carlos Aparicio Diaz Toledo, D. Enrique Coloma Ayuso y D. Manuel Navajas Rodríguez, que tomaron parte en la construcción de los prototipos de vuelo y equipos de tierra, así como a D. José Juan Marina González, que llevó a cabo con interés y esmero los trabajos de delineación y también a la sección de Reprografía del Centro por su eficaz colaboración.

Debe hacer especial mención de la ayuda recibida del Director del APW, Prof. Dr. Karl Rawer, y de sus colaboradores H. Lothar Unger y H. Manfred Knothe que le dispensaron una cordial acogida y le prestaron su apoyo científico y técnico en todo momento durante sus varias estancias en su Instituto.

CAPITULO 1

PLANTEAMIENTO GENERAL

1.1. ANTECEDENTES

Los primeros indicios de la existencia de capas ionizadas en la atmósfera, los proporcionaron las reflexiones de las ondas electromagnéticas en ella. Durante la década de los veinte del presente siglo, se trabajó en una teoría que explicase este fenómeno, llegándose a la llamada teoría magneto-iónica, principalmente atribuida a Sir Edward Appleton (1). En 1931, D.R. Hartree - incluyó en ella el término de polarización de Lorentz, - (2) y más tarde en 1935 Goubau la modificó para tener en cuenta la presencia de los iones pesados (3). Esta teoría ha sido resumida por Ratcliffe (4) y ha resultado muy adecuada para la investigación de la Ionosfera mediante ondas electromagnéticas.

En un principio, el único motivo para la investigación sobre la distribución de electrones, era la necesidad de predecir las posibilidades de comunicaciones radioeléctricas de largo alcance. Hasta principios de la

década de los cuarenta, no se demostró un verdadero interés por el conocimiento de la Ionosfera desde un punto de vista puramente científico, desarrollándose a partir de entonces una cantidad considerable de métodos de medida. En las tres secciones siguientes se pasa revista a los más importantes, poniendo de relieve sus ventajas e inconvenientes. En la sección 1.4 se expone brevemente el sistema adoptado por el autor, así como las razones que le han inducido a ello.

1.2. MEDIDAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, REALIZADAS DESDE EL SUELO MEDIANTE ONDAS ELECTROMAGNETICAS.

Son las más económicas y pueden llevarse a cabo en forma continua; fueron las primeras en desarrollarse y hoy día, representan la mayor fuente de información. A continuación se describen las más usadas.

1.2.1. Sondeo de la Ionosfera con impulsos electromagnéticos emitidos verticalmente desde el suelo.

Estos sondeos se llevan a cabo transmitiendo desde el suelo en dirección vertical hacia la Ionosfera impulsos, cuya frecuencia portadora, varía lentamente entre 1 MHz y 10 MHz. Se registra el tiempo que tardan estos impulsos en volver al suelo, después de reflejarse -

en la ionosfera, en función de la frecuencia portadora. Se acostumbra a sustituir este tiempo por la altura a - que estaría colocada una capa reflectora, perfectamente conductora, de forma que las ondas tardaran el tiempo me dido viajando a la velocidad de la luz en el vacío. A es ta altura se la denomina altura virtual. Los registros - de la altura virtual en función de la frecuencia, reci- ben el nombre de ionogramas y los aparatos destinados a su confección ionosondas.

La principal dificultad estriba en pasar del - ionograma a una distribución de densidad de electrones - en función de la altura real. Para lograr esto, se han - elaborado varios métodos aproximados con excelentes re- sultados (5).

Los ionogramas han resultado de gran valor pa- ra la investigación de las regiones E y F, pero no para la D y zona baja de la E. Esto es debido a que sería ne- cesario utilizar frecuencias muy bajas y es muy difícil ra diar impulsos suficientemente cortos para conseguir una buena resolución en altura.

Para el estudio de estas regiones resulta mu- cho más adecuado el uso del sistema descrito en 1.2.2.

Otra limitación de este sistema, consiste en - que no se puede conseguir información de alturas superio-

res a la del máximo (absoluto) de densidad de la capa F. De la misma forma quedan ocultos todos los mínimos relativos o "valles" de alturas inferiores (6).

1.2.2. Medidas basadas en los cambios de fase de una onda electromagnética, emitida desde el suelo, después de serreflejada por la Ionosfera.

Básicamente, consiste en enviar una onda de baja frecuencia y comparar su fase con la misma onda una vez reflejada por la Ionosfera y recibida en el suelo. Se han desarrollado varios métodos para tratar esta información. El más sencillo, consiste en registrar los cambios de fase con el tiempo, lo que equivale a registrar los cambios de altura virtual de la capa reflectora. Otros métodos consisten en estudiar el cambio de fase en función de la distancia a lo largo del suelo, deduciéndose de éstos la altura virtual de la capa reflectora.

Este sistema es especialmente apropiado para la medida de las capas muy bajas y se complementa con el descrito en 1.2.1, que no tiene precisión en estas capas.

1.2.3. Medidas basadas en la cantidad de energía devuelta por la Ionosfera, por dispersión incoherente - de una onda de muy alta frecuencia emitida desde el suelo.

Los dos métodos anteriores hacen uso de las - propiedades coherentes de la Ionosfera, basadas en los - índices de refracción dados por la ecuación de Appleton-Hartree. W.E. GORDON (7) fué el primero en considerar las posibilidades de uso de la dispersión incoherente de las ondas electromagnéticas por electrones libres, a frecuencias bastante superiores a las del plasma. Una pequeña - parte de la energía enviada, es reflejada hacia el transmisor, siendo ésta proporcional a la densidad de electrones en la capa, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a que se encuentra esta; pudiéndose así determinar la distribución de la densidad electrónica en función de la altura.

Entre todos los sistemas basados en medidas realizadas desde el suelo, éste parece el más exacto hasta el momento, pudiendo realizarse medidas en los "valles" y por encima del máximo de la capa F.

Su principal inconveniente es que necesita transmisores de gran potencia y antenas de alta ganancia y - grandes dimensiones, colocadas en lugares de bajo nivel de ruido industrial y urbano.

1.2.4. Medidas basadas en la observación y estudio de - las ondas electromagnéticas de frecuencia audible, generadas por la Atmósfera terrestre, (silbidos).

Los silbidos atmosféricos son ondas electromagnéticas de corta duración y frecuencia audible, que generalmente disminuye con el tiempo. Pueden ser oídos, y registrados, conectando un amplificador de suficiente sensibilidad a una antena de grandes dimensiones (8).

Su origen es debido a las descargas eléctricas en la atmósfera, que generan un paquete de ondas de varias frecuencias audibles. Estas ondas se propagan, como en una guía de ondas, a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre, llegando en el tiempo de 1 segundo, aproximadamente, al hemisferio opuesto, donde son reflejadas, volviendo una y otra vez al punto de partida después de sucesivas reflexiones. La propagación se realiza en el modo electrónico con muy poca atenuación, pero con dispersión considerable. La diferencia de tiempo entre un silbido y sus ecos, así como su espectro de frecuencia en función del tiempo, depende de la intensidad del campo magnético y del contenido total de electrones a lo largo del camino de propagación. Siendo posible deducir de estos datos, la densidad de electrones a lo largo de este camino.

La importancia de este método consiste en que es de los pocos que permiten medir la densidad electrónica a grandes distancias del suelo; en contrapartida, resulta de poca exactitud para medidas en las capas bajas de la ionosfera.

1.3. MEDIDAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, REALIZADAS DESDE VEHICULOS ESPACIALES.

Hemos visto que todos los sistemas en que las medidas se realizan desde el suelo, tienen la dificultad de no poder aislar los efectos de la ionización a un nivel determinado, sino que proporcionan una información integrada a lo largo del camino de propagación. Esto da lugar a unos cálculos muy laboriosos y a una exactitud limitada. Para evitar estos inconvenientes, se han desarrollado nuevos métodos de medida, realizables desde vehículos espaciales, desapareciendo muchas indeterminaciones, al poder conocer exactamente la altura a que se realiza esta. Las obvias ventajas de estos sistemas, están parcialmente contrapesadas por el elevado coste económico y por ser necesario realizar un lanzamiento cada vez que se quiere obtener una medida.

En los apartados siguientes se describen los sistemas más usuales.

1.3.1. Medida de las características del Plasma Ionosférico mediante Sondas de Langmuir.

En el año 1924 Langmuir (9) desarrolló la teoría que explicaba el comportamiento de un electrodo sumergido en un plasma y conectado a un potencial variable. De la característica tensión-corriente de éste, es posible deducir la densidad y temperatura de iones y electrones. Recientemente se ha intentado su aplicación al estudio del plasma ionosférico, haciéndose la primera prueba con el Sputnik III (10). Basándose en el mismo principio, se han desarrollado sondas bastante complejas, que hacen uso de varias rejillas que rodean el electrodo colector, a las que se aplican determinados potenciales aceleradores o retardadores.

El uso de estas sondas presenta varios problemas, en parte ya resueltos. Entre ellos, está el de la contaminación de la superficie de la sonda por polvo o gases; la variación del potencial flotante entre el sistema portador y el plasma y el desprendimiento de fotoelectrones por exposición directa a los rayos solares. Además, se ha llegado a la conclusión, de que resulta muy difícil el cálculo exacto de la densidad de electrones a partir del valor de la corriente captada por la sonda. Con la intención de evitar este último inconveniente, se ha adoptado

por unanimidad en la reunión del 9 de diciembre de 1969 de la Royal Society en Londres y a propuesta del Prof. S.A. Bowhill de la Univ. de Illinois, la recomendación de incluir en cualquier satélite o cohete que contenga sondas destinadas a la medida "in situ" de la densidad electrónica, un experimento del tipo de "propagación de ondas" para ser tomado como patrón de calibración.

Entre los problemas sin resolver figuran los - fenómenos de histéresis de la característica tensión-co rriente, cuando se somete la sonda a sucesivos barridos de tensión en sentidos ascendente y descendente. La amplitud de esta histéresis depende de la frecuencia de ba rrido y de la naturaleza de la superficie de la sonda, - así como del tiempo transcurrido después de su construc- ción.

1.3.2. Medida de las características del Plasma Ionosfé- rico mediante Sondas de Radiofrecuencia.

Observando la variación de la impedancia de - las antenas de un vehículo espacial en viaje por la Ionos fera, surgió la idea de realizar una medida de la densi- dad electrónica (11). Actualmente, se ha desarrollado una serie de sondas que se basan en la medida de la impedan- cia existente entre dos electrodos a una frecuencia com- prendida entre 1 MHz y 30 MHz (12).

Con este sistema se ha intentado eliminar algunas limitaciones de las sondas de Langmuir, tales como - el efecto foto-eléctrico y la histéresis; pero ha permanecido el peligro de contaminación por gases desprendidos del vehículo (13).

1.3.3. Sondeo de la Ionosfera con impulsos electromagnéticos emitidos verticalmente desde Satélites Artificiales.

Este sistema es idéntico al descrito en 1.2.1, pero al estar instalada la ionosonda en un satélite, la información que se obtiene corresponde a la zona situada más arriba del punto de máxima densidad en la capa F.

Hasta el momento se han construido cinco satélites equipados con ionosondas: Alouette I, Explorer XX, Alouette II, ISIS-I e ISIS-B y se está preparando un sexto, el ISIS-C dedicado al estudio de la muy alta Ionosfera (14).

1.4. MEDIDAS DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, REALIZADAS MEDIANTE LA OBSERVACION DE LA PROPAGACION DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS ENTRE EL SUELO Y UN VEHICULO ESPACIAL.

Todos los sistemas descritos en esta sección - son igualmente aplicables a cohetes-sonda y satélites; -

pero resultan más exactos cuando se aplican a cohetes-sonda, que normalmente ascienden en dirección vertical a la Ionosfera, pues el camino de propagación es conocido y coincide en todos los casos con el recorrido por el cohete; en cambio, cuando se aplican a satélites, la dirección del camino de propagación cambia constantemente, lo que obliga a realizar laboriosos cálculos de trazado de caminos de propagación que restan exactitud a los resultados finales.

1.4.1. Medidas basadas en la rotación sufrida por el plano de polarización de una onda electromagnética - al propagarse entre el suelo y un vehículo espacial.

De acuerdo con la teoría magneto-iónica de Appleton-Hartree, al propagarse por la Ionosfera una onda electromagnética polarizada en un plano, se descompone en dos modos, iónico y electrónico, los cuales presentan una polarización circular en sentidos opuestos. Para frecuencias superiores a la crítica del plasma, la velocidad de fase del modo iónico es ligeramente menor que la del electrónico. Si suponemos que una onda polarizada en un plano se propaga a través de la Ionosfera, variará su ángulo de polarización proporcionalmente a la intensidad de campo magnético, a la longitud recorrida y a la densi

dad electrónica. A este fenómeno se llama rotación de Fa raday, por analogía con la Optica.

Aprovechando este fenómeno, se ha desarrollado un método para medir la densidad electrónica, consistente en instalar un trasmisor en un vehículo espacial, con una antena polarizada en un plano y observar en tierra - las variaciones del ángulo de polarización.

Se ha intentado aplicar este método a satélites, pero se ha encontrado muchas dificultades para el - cálculo del trayecto seguido por la propagación. En cambio ha dado excelentes resultados con cohetes lanzados - verticalmente, a condición de que no tengan giro sobre - su eje, lo cual no siempre es posible.

1.4.2. Medidas basadas en el efecto Doppler dispersivo, sufrido por una onda electromagnética al propagar se entre el suelo y un vehículo espacial.

Cuando se recibe una señal procedente de un - vehículo que se mueve a través de un medio uniforme, se aprecia que la frecuencia de la señal recibida varía de acuerdo con el conocido efecto Doppler. Pero cuando la - señal atraviesa un medio no uniforme, como es la Ionosfe - ra, se produce una variación adicional de la frecuencia recibida, la cual depende de la variación del índice de refracción, que es función de la densidad de electrones.

Se ha intentado aplicar este principio para calcular la densidad electrónica en la Ionosfera, observando desde tierra el cambio aparente de la frecuencia de un transmisor instalado en un vehículo espacial (15); pero se ha visto que los cambios de frecuencia del oscilador del transmisor son comparables en magnitud a los producidos por la Ionosfera, disminuyendo la precisión del método (16). Además, al tratarse de un medio con índice de refracción variable, el camino de propagación de los rayos no es necesariamente rectilíneo, llevando esto a la hora de interpretación de resultados, a laboriosos cálculos de caminos de propagación, que al ser aproximados producen un aumento de la incertidumbre de los resultados.

1.4.3. Medidas basadas en la comparación de velocidades de fase de dos ondas relacionadas armónicamente que se propagan entre un vehículo espacial y el suelo.

Con el fin de evitar los inconvenientes del sistema descrito en el apartado anterior fué ideado, por Seddon (17) y Berning (15) separadamente, un sistema en el que se comparasen las velocidades de fase de dos ondas radiadas desde un cohete y recibidas en tierra. De esta comparación se puede deducir el índice de refracción

de las diversas capas de la Ionosfera y a partir de éste se calcula la distribución de electrones.

El principio de medida es la técnica Doppler diferencial, en la que el efecto Doppler cinemático y la inestabilidad del oscilador quedan compensados.

Para medir el índice de refracción se efectúa una transmisión de dos ondas electromagnéticas de frecuencias f_1 y f_2 ($f_2=nf_1$), generadas a partir de un único oscilador por multiplicación o división.

La frecuencia f_2 se elige lo suficientemente elevada para que resulte inafectada al propagarse por la Ionosfera, es decir su valor cambiará únicamente por acción del efecto Doppler cinemático.

La frecuencia f_1 será mayor que la crítica de las capas que atraviesa, pero lo bastante cercana a esta para que la Ionosfera produzca una variación de su velocidad de fase por efecto Doppler dispersivo, que se añade a la acción del efecto Doppler cinemático.

Ambas ondas son recibidas en tierra, donde se compara la frecuencia superior con la inferior una vez multiplicada por el factor n . De esta comparación se deduce el valor del índice de refracción de la Ionosfera a lo largo del camino recorrido por el cohete. Este está relacionado por la ecuación de dispersión del plasma con

la densidad electrónica local, pudiéndose calcular por tanto esta última.

En el caso de uso de ondas de frecuencia baja (3 MHz a 6 MHz), es necesario tener en cuenta la influencia de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas, especialmente importante en la capa D. La determinación de la frecuencia de colisión, se lleva a cabo para un sólo punto de la trayectoria del cohete y luego se extrapola al resto, esta determinación se hace observando la altura a que el modo electrónico es reflejado por la Ionosfera; cuando este no es reflejado, se desprecia el efecto de la frecuencia de colisión para la determinación de la densidad electrónica.

Las frecuencias de trabajo han variado grandemente según los experimentadores. Seddon y sus colaboradores han utilizado unas frecuencias inferiores de 4'274 MHz (17, 18, 19, 20) en sus primeros lanzamientos, posteriormente de 7'754 MHz (21, 22, 23) y recientemente de 12'26 MHz (24, 25, 26, 27) en todos los casos con un factor de diferencia entre la inferior y superior de 6. -- Bauer (28) ha utilizado en el año 1963 una frecuencia inferior de 24'53 MHz y un factor 3, con el fin de poder emplear antenas de pequeño tamaño en el cohete. Berning, (15, 29) ha utilizado unas frecuencias aun mayores: 37 y

148 MHz, mediante las que ha podido medir densidades inferiores a 10^4 electrones/cm³ a 1.400 km de altura, siendo las potencias transmitidas inferiores a 100 mW.

Para mayor sencillez del experimento se prescindie de sistema auxiliar de telemetría y se utiliza al efecto la más alta de las frecuencias, modulándola mediante varias subportadoras, moduladas en frecuencia por la información procedente de los instrumentos de navegación y otros experimentos que comparten el mismo cohete.

En tierra, se separan las subportadoras antes de realizar la comparación de frecuencias, no produciéndose ninguna alteración de esta.

Este sistema para la medida de la densidad electrónica en la Ionosfera, ha demostrado, a lo largo de las repetidas ocasiones en que ha sido empleado, poseer una utilidad y exactitud aun no superadas por otros procedimientos.

Desafortunadamente, presenta ciertas limitaciones de orden práctico que reducen su campo de aplicación a una parte de la Ionosfera, que depende de la elección de la frecuencia de trabajo. Cuando se trabaja con frecuencias próximas a las críticas de la Ionosfera, se consigue gran sensibilidad, lográndose que la onda de frecuencia f_1 resulte muy afectada por esta. De esta for

ma se pueden realizar medidas de densidades electrónicas muy pequeñas con aceptable exactitud y sin grandes complicaciones a la hora de interpretar los resultados; pero el uso de estas frecuencias también proporciona inconvenientes: cuando alguna de las capas de la Ionosfera presenta una frecuencia crítica igual a f_1 , al producirse el paso del cohete por esta capa se interrumpe la propagación de dicha frecuencia, y a partir de ese momento no se puede continuar la medida (17, 18, 19, 20). Además, momentos antes de producirse la interrupción, se recibe juntamente con la onda directa, la reflejada en la Ionosfera, ambas con intensidades parecidas, produciéndose interferencias que pueden conducir a resultados totalmente erróneos (19); aunque en parte evitables cuando se dispone de un receptor provisto de C.A.G. y se registran las variaciones de su tensión de control. Con el uso de frecuencias muy superiores a las críticas de la Ionosfera, se evitan todos estos inconvenientes y se simplifica la aplicación de la ecuación de dispersión, ya que no es necesario tomar en cuenta las colisiones de los electrones con las demás partículas; pero la onda de frecuencia f_1 resulta muy poco afectada por la Ionosfera, siendo inapreciable la alteración debida a las capas de pequeña densidad electrónica. Por tanto, estas frecuencias no proporcionan información de las capas de densidad elec-

trónica débil.

Una desventaja adicional de este sistema es la complicación que presenta el equipo receptor, motivada - por la necesidad de separar los modos iónico y electrónico y por el bajo nivel de las señales a recibir:

La onda radiada desde el cohete está polarizada en un plano. Tal clase de onda no es propagable a través del plasma ionosférico en la mayor parte de los casos, - produciéndose un desdoblamiento en los dos modos que se pueden propagar por el plasma, iónico y electrónico, ambos con polarización elíptica pero con velocidades de fase diferentes. Al llegar al extremo receptor, es necesario separarlos para evitar que se interfieran entre sí; esto se hace con la ayuda de un complicado sistema de antenas conectadas a un no menos complicado sistema de uniones híbridas, realizadas a base de cables (30), que proporcionan considerable trabajo para ajuste y construcción.

Debido a que los amplificadores de potencia de los transmisores tienen gran peso y volumen y presentan - un consumo grande de energía, en los experimentos realizados hasta ahora no se radiaban potencias superiores a algunos watios, y aun esto a costa de consumir casi todo el lugar, peso y energía disponibles en el cohete. Ahora

bien, la potencia realmente radiada es todavía menor debido a la desintonía que se produce en las antenas cuando quedan inmersas en el plasma ionosférico (31). Todo esto, es causa de que la intensidad de campo en el receptor sea muy pequeña, conduciendo al uso de receptores con una sensibilidad muy fuera de lo corriente, en combinación con antenas muy directivas situadas en lugares de bajo ruido industrial. Aun así es frecuente la anulación de la señal recibida durante cortos intervalos y la interferencia producida por otras señales de igual frecuencia.

1.5. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE MEDIDA PROPIO

Se ha pasado revista en las secciones anteriores a una serie de sistemas destinados a la medida de la Densidad electrónica local en la Ionosfera, separados en tres grupos genéricos, según el lugar de realización: desde el suelo, desde vehículos espaciales y por propagación de ondas entre suelo y vehículo espacial. Hemos puesto de manifiesto que el primer grupo lo forman los sistemas más económicos pero de exactitud limitada; el segundo está formado por sistemas que analizados teóricamente deberían ser los más exactos, pero que en la práctica sufren efectos secundarios que enmascaran los resul

tados obtenidos; el tercer grupo está integrado por sistemas con fundamentos similares a los del primer grupo, con la gran diferencia de que en ellos no existe ninguna incertidumbre a cerca de la altura a que se realizan las medidas y se puede decir que en líneas generales son los más precisos.

El CIF ha seleccionado para sus medidas un conjunto de sistemas de medida que se complementan entre sí. Se ha decidido el estudio y desarrollo de un sistema del segundo grupo y otro del tercero, contando con el apoyo, en el momento de la medida, de alguno del grupo primero, con los que se encuentran equipados rutinariamente las bases de lanzamiento.

Perteneciente al grupo primero se usará una Ionosonda; servirá para proporcionar una impresión cualitativa de la distribución, en función de la altura, de la densidad electrónica de la Ionosfera y como se verá en el próximo capítulo, para comprobar la corrección de las medidas realizadas con los otros sistemas.

Del grupo segundo, se usarán tres clases diferentes de Sondas de Langmuir: una destinada a la medida de la densidad y temperatura electrónica; otra destinada a la medida exclusiva de la temperatura electrónica y finalmente dos sondas idénticas destinadas a la medida de

la densidad iónica e indirectamente a la medida de la densidad electrónica y dirección de los vientos ionosféricos. Estas sondas están siendo desarrolladas por el autor en los laboratorios del CIF y espera deducir con su uso una teoría que explique el comportamiento de tales sondas en el plasma ionosférico, más bien que una medida precisa de las características de éste. No serán pues objeto de atención en este trabajo.

Como sistema central del programa se ha elegido uno del tercer grupo, con el que se espera obtener unas medidas de absoluta confianza. Según lo expuesto en el apartado 1.4.3. la elección debe recaer obviamente en el sistema de medida basado en la comparación de velocidades de fase de dos ondas relacionadas armónicamente que se propagan entre un vehículo espacial y el suelo. Como también se ha visto, este sistema implica el uso de equipo electrónico bastante complicado y presenta ciertas limitaciones en su aplicación, todo lo cual le hace menos deseable.

Para evitar estos inconvenientes, el autor ha desarrollado un sistema de medida, similar al expuesto, pero con un planteamiento teórico diferente y unas soluciones experimentales completamente nuevas, tal como se describe en los apartados siguientes.

1.5.1. Propagación en un modo único: iónico.

Todos los experimentadores han utilizado hasta ahora ondas polarizadas en un plano, las cuales se desdoblan en los dos únicos modos capaces de propagarse en el medio, el iónico y el electrónico. En el extremo receptor es necesario separar ambos modos para que no se interfieran uno y otro. La separación se hace mediante un complicado sistema de antenas y uniones híbridas, llevando las señales resultantes a dos receptores idénticos - que los amplifican y procesan separadamente.

El autor ha evitado la necesidad de separar ambos modos, con la complicación del sistema que esto trae consigo, transmitiendo solamente uno de ellos, que es el único que se propaga y llega a la antena receptora. El elegido ha sido el iónico, porque sufre menos atenuación que el electrónico.

La generación de dicho modo se efectúa mediante una antena con la polarización conveniente. Esta dependerá del lugar geográfico de realización de la medida, siendo elíptica en el caso general y plana o circular en algunos casos particulares.

1.5.2. Comparación de la velocidad de fase de TRES frecuencias armónicas y determinación de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas.

Con el fin de evitar las limitaciones del sistema al estudio exclusivo de las capas de alta o baja densidad, se trabaja con tres frecuencias: 5 MHz, 20 MHz y 80 MHz, agrupadas en dos parejas: 5 MHz y 20 MHz como pareja primera y 20 MHz y 80 MHz como segunda.

La primera pareja es muy sensible, por ser la frecuencia inferior próxima a las críticas de la Ionosfera. Con ella se puede realizar una medida precisa de las pequeñas densidades electrónicas que se encuentran en la capa D. Cuando el cohete atraviesa la capa en que se produce la reflexión de la onda de 5 MHz, esta pareja deja de proporcionar información. A partir de entonces se utilizan los datos suministrados por la segunda pareja, que ya presenta una considerable alteración debida a la Ionosfera.

Existe una zona intermedia en la que se recibe información de ambas parejas. Por comparación de los datos suministrados por cada una de ellas se puede determinar la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas en esta zona. Así se logra una determinación de ésta, más exacta que la que se logra -

cuando sólo se realiza la medida en un punto de la trayectoria y después se extrapola para todo el resto; dando lugar a un cálculo más exacto de la densidad electrónica local.

1.5.3. Disposición de los transmisores y receptores.

Hasta ahora se han situado los transmisores del experimento en el cohete y los receptores en tierra. De esta forma se evitaba el empleo de un sistema de telemetría adicional, enviando las informaciones que suministrasen otros instrumentos de a bordo mediante varias subportadoras que modulaban la frecuencia superior del experimento.

Hoy se equipan rutinariamente los cohetes-sonda con sistemas de telemetría, producidos en serie por la industria a relativo bajo precio, y todas las bases de lanzamiento están provistas de los sistemas receptores correspondientes. Ha perdido interés, por tanto, el uso de los transmisores del experimento como medio de telemetría.

En consecuencia, se han instalado los transmisores en el suelo, siendo así posible transmitir grandes potencias: 1000 W en 5 MHz, 200 W en 20 MHz y 100 W en 80 MHz, quedando a cubierto de todas las posibilidades

de ruido, desaparición de señal e interferencias, aun en lugares próximos a zonas industriales. Además se facilita la instalación de antenas emisoras con una polarización definida, lo cual es bastante difícil de conseguir en el cohete, como se ve en el Capítulo 4º.

En cambio, la instalación del receptor en el cohete no presenta ningún problema, ya que su peso, volumen y consumo de energía son muy reducidos.

1.5.4. Operación del sistema de medida.

A modo de resumen, se describe a continuación la operación del sistema de medida propio, cuyo diagrama de bloques aparece en la figura 1.1.

Se dispone en el suelo de tres transmisores, - que radian tres ondas de frecuencias relacionadas armónicamente, de tal forma que las tres ondas sean coherentes en fase, para lo cual se utiliza un sólo oscilador de alta estabilidad, obteniéndose las frecuencias más altas - por multiplicación. Las potencias y frecuencias de dichos transmisores son:

1º.- 1000 W , 5 MHz

2º.- 200 W , 20 MHz

3º.- 100 W , 80 MHz

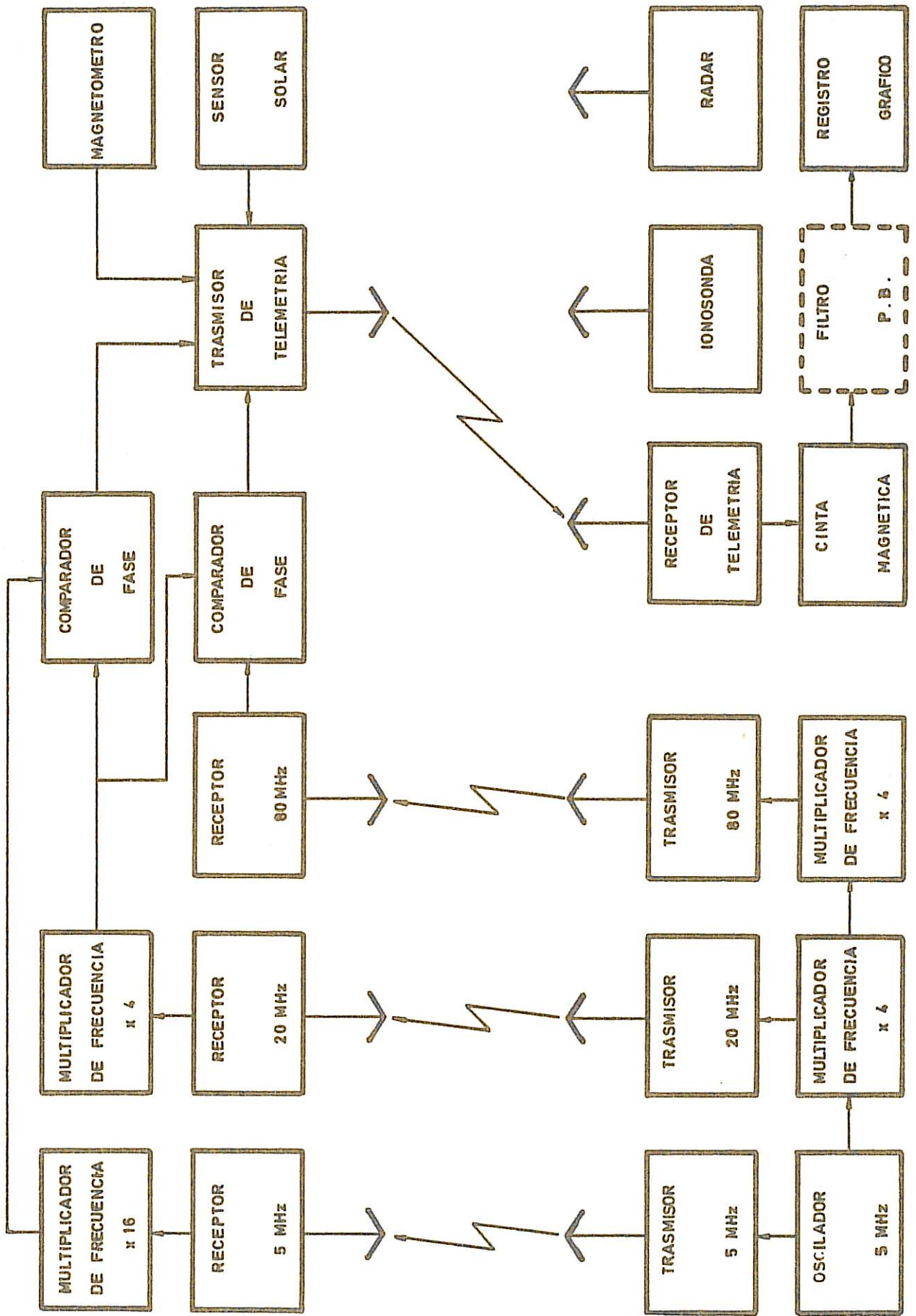


DIAGRAMA DE OPERACION DEL SISTEMA PROPIO

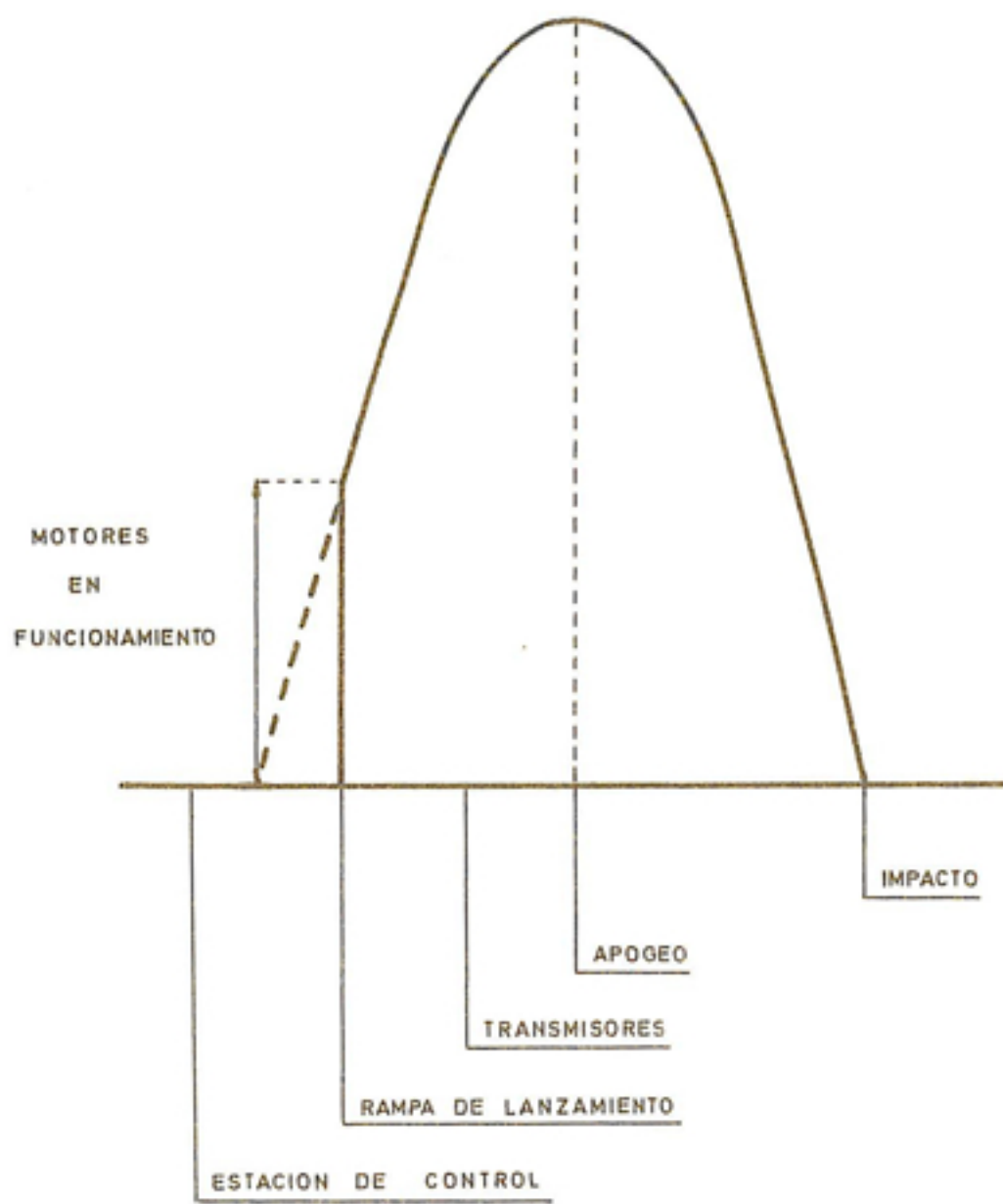
FIG. 1.1

Las antenas de los transmisores están diseñadas de forma que radien únicamente en el modo iónico de propagación. En la latitud en que se ha realizado la medida (Círculo Polar Artico), el modo iónico presenta polarización circular, por tanto las antenas están polarizadas circularmente.

La medida se realiza con la ayuda de un cohete sonda, lanzado casi verticalmente en dirección a la Ionosfera. En él van instalados tres receptores para las frecuencias 5 MHz, 20 MHz y 80 MHz. Los transmisores están situados bajo la parte ascendente de la trayectoria del cohete, tal como se indica en la figura 1.2.

Los transmisores funcionan durante todo el tiempo en que el cohete está en el aire. Durante la parte ascendente de la trayectoria, se puede considerar que el camino de propagación de las ondas recibidas por los receptores del cohete, es prácticamente vertical.

Las tres ondas sufren un efecto Doppler cinemático, pero además las dos ondas de frecuencias inferiores sufren una variación de velocidad de fase por acción de la Ionosfera. Esta variación es función de la densidad electrónica local y de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas.



TRAYECTORIA DEL COHETE

FIG. 1.2

En el cohete, una vez recibidas y amplificadas las tres ondas, se multiplican las frecuencias 5 MHz y 20 MHz por factores 16 y 4 respectivamente, efectuando después una comparación de frecuencia entre 16×5 MHz y 4×20 MHz por un lado y entre 4×20 MHz y 80 MHz por otro. En esta comparación se compensan las variaciones de frecuencia debidas al efecto Doppler cinemático; pero la acción de la Ionosfera no tiene compensación y da lugar a unas diferencias de frecuencia B_1 y B_2 entre 5 MHz y 20 MHz por una parte, y 20 MHz y 80 MHz por otra. B_1 y B_2 se transmiten a tierra a través del sistema de telemetría, y son registradas en una cinta magnética.

De B_1 y B_2 se deduce el valor de los índices de refracción de la Ionosfera para 5 MHz y 20 MHz. Partiendo de éstos, y basándose en la ecuación de dispersión del plasma ionosférico, se calculan la densidad electrónica local a lo largo de la trayectoria y la frecuencia efectiva de colisión de los electrones con las demás partículas a lo largo de parte de ella.

Para estos cálculos, es necesario conocer la magnitud y dirección del campo magnético terrestre a lo largo de la trayectoria. Cuando es posible, se incluye en la instrumentación del cohete un magnetómetro, que envía sus datos a tierra a través del sistema de telemetría.

tría. En el caso en que por economía o falta de lugar no se incluya el magnetómetro en el cohete, se medirá el campo magnético en el suelo y extrapolará para los puntos de la trayectoria del cohete.

También es necesario asegurarse de que el estado de la Ionosfera no cambie mientras dura la medida, y si cambia, conviene saber en que forma lo hace. Para ello se utiliza una Ionosonda, que funciona desde una hora antes hasta una hora después del lanzamiento, excepto en los minutos que éste tiene lugar, para evitar interferencias en las medidas.

Naturalmente, es necesario conocer la posición y actitud del cohete, con la mayor exactitud posible. La posición, se suele obtener por seguimiento con Radar. Para determinar la actitud, se pueden utilizar los datos suministrados, a través del sistema de telemetría, por un magnetómetro, de 3 ejes, y un sensor solar; si se desea, se pueden sustituir estos últimos por un giróscopo, aunque este resulta más caro.

Las señales procedentes del sistema de telemetría quedan registrados en una cinta magnética, en la que también se incluyen las señales procedentes de un reloj de alta estabilidad; para mayor facilidad se registran por separado dos escalas, una en segundos y otra en

decenas de segundo. Posteriormente se pasan las señales de esta cinta a un registrador gráfico de ocho pistas, - con distintas velocidades de escritura, con el fin de es tudiar cómodamente las señales. Si estas presentan mucho ruido y es difícil su interpretación, se pasarán previamente por un filtro paso-bajo.

CAPITULO 2

ANALISIS FISICO-MATEMATICO DEL SISTEMA DE MEDIDA PROPIO

2.1. NATURALEZA DE LA IONOSFERA

Para nuestros fines y de acuerdo con el IRE - (32), podemos definir la Ionosfera como "la parte exterior de la Atmósfera terrestre en la que existen iones y electrones en cantidad suficiente para afectar a la propagación de una onda electromagnética"; se puede considerar que empieza a 40 km de altura sobre el suelo y se extiende hasta una distancia del orden de varias veces el radio terrestre. Desde un punto de vista más general y moderno, la podemos considerar como un magnetoplasma - frío, parcialmente ionizado, formando capas concéntricas de diferente densidad iónica y electrónica, cuyo gradiente es perpendicular a la superficie terrestre.

A continuación, damos el valor aproximado de algunas magnitudes, en una Ionosfera tipo, que más adelante vamos a necesitar:

Altura (km)	Densidad Electrónica $\log(e1/m^3)$	Peso Molecular medio	Frecuencia de colisión (s^{-1})
40	0 a 6	28'96	$2'1 \cdot 10^7$
60	2 a 8	28'96	$1'8 \cdot 10^6$
80	7 a 9	28'97	$9'1 \cdot 10^4$
100	9 a 11	28'90	$1'7 \cdot 10^3$
200	11 a 12	26'32	5'3
300	11 a 12	21'95	0'9
500	10 a 11	18'28	0'06

Relación de masasa del protón y electrón:

$$m_p/m_e = 1838$$

El módulo del valor de la densidad de flujo del campo magnético terrestre (a nivel del suelo), varía entre $2'4 \cdot 10^5 \text{ Wb/m}^{-2}$ y $6'73 \cdot 10^{-5} \text{ Wb/m}^{-2}$, dependiendo de la situación geográfica del punto de medida.

2.2. ESTUDIO DE LAS ECUACIONES DE DISPERSION Y POLARIZACION EN LA IONOSFERA

La propagación de ondas en la Ionosfera se rige por las ecuaciones de dispersión y de polarización, - deducidas por Appleton y Hartree, considerando los electrones como las únicas partículas con carga eléctrica.

Goubau modificó estas fórmulas para incluir en ellas la influencia de los iones. Nosotros no tendremos en cuenta esta modificación, ya que la influencia de las partículas cargadas eléctricamente es inversamente proporcional (en primera aproximación) a su masa, y como hemos visto, la masa media de los iones es unas 40.000 veces superior a la del electrón.

Las ecuaciones de Appleton y Hartree, que dan el índice de refracción complejo y la polarización, para una onda electromagnética de poca intensidad (densidad de flujo magnético $\ll B_0$) que se propaga en un magnetoplasma homogéneo son:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - Y_T^2/2(1-X-jZ) \pm \left[Y_L^2 + Y_T^4/4(1-X-jZ)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.1)$$

$$R = -j \left\{ Y_T^2/2(1-X-jZ) \mp \left[Y_L^2 + Y_T^4/4(1-X-jZ)^2 \right]^{1/2} \right\} 1/Y_L \quad (2.2)$$

donde:

$$X = Ne^2/\epsilon_0 m\omega^2$$

$$Y = B_0 e/m\omega$$

$$Y_T = Y \sin \theta$$

$$Y_L = Y \cos \theta$$

$$Z = \gamma / w$$

w = frecuencia angular de la onda electromagnética

N = densidad electrónica del plasma

e = valor absoluto de la carga del electrón

m = masa del electrón

ϵ_0 = permitividad del espacio libre

B_{α} = densidad de flujo del campo magnético terrestre

γ = frecuencia efectiva de colisión de los electrones -
con los otros constituyentes del plasma

θ = ángulo formado por el vector B_{α} y la dirección de
propagación de la onda electromagnética

Estas ecuaciones sólo son estrictamente válidas para un plasma homogéneo, pero también se pueden aplicar a medios que varían lentamente, como la Ionosfera, - (el cambio del índice de refracción es muy pequeño dentro de una longitud de onda).

De la ecuación (2.1) se deduce que el índice de refracción presenta una parte real y otra imaginaria. La parte real representa la variación de la velocidad de fase y la imaginaria (debida a las colisiones de los electrones con otras partículas) representa la atenuación de onda.

Tanto el índice de refracción n como el coeficiente de polarización R pueden tomar dos valores según se elija el signo $+$ o el $-$ en la raíz cuadrada. Esto indica que en la Ionosfera se pueden propagar dos ondas características y nada más que dos; siendo su polarización generalmente elíptica y en algunos casos particulares - circular o plana.

La mayoría de los autores, llaman a estas ondas características modos ordinario y extraordinario, - por analogía con la propagación de la luz en ciertos - cristales birrefringentes. Algún autor moderno (33) los llama modos "de derecha" y "de izquierda", aludiendo al - sentido de rotación del vector campo eléctrico. Nosotros siguiendo al Prof. Rawer (34), les daremos el nombre de modo iónico y modo electrónico.

Cuando una onda plana se propaga en una dirección paralela al vector B_{ω} , las ondas características presentan polarización circular, con sentidos de giro - opuestos, siendo en todo momento perpendiculares entre sí el campo eléctrico de la onda y el vector B_{ω} . Esto, motiva un giro de iones y electrones alrededor del vector B_{ω} , la onda característica correspondiente al signo $+$ gira en el mismo sentido en que tienden a hacerlo - los iones, favoreciendo su movimiento de giro, mientras

que contrarresta el de los electrones; la onda característica correspondiente al signo -, produce el efecto contrario. Esto justifica que las ondas características correspondientes a los signos + y - reciban los nombres de modos iónico y electrónico.

Generalmente, al propagarse una onda por la I_0 nosfera el índice de refracción depende del valor del vector B_x , esto es el caso "ordinario"; en el caso especialísimo de una onda plana, que se propague perpendicularmente al vector B_x , le corresponde al modo iónico un índice de refracción que no depende de B_x , lo que es un caso verdaderamente "extraordinario". El uso de la primera denominación, conduciría a la contradicción de que el modo "extraordinario" es precisamente el ordinario. No es más afortunada la segunda denominación, puesto que al ser los signos del vector B_x opuestos en cada hemisferio, un mismo modo gira con sentidos diferentes según el hemisferio en que se propague, dando también lugar a confusiones indeseables.

2.2.1. Aproximaciones casi longitudinal y casi trasversal de las ecuaciones de dispersión y polarización

Para aplicar las ecuaciones de dispersión y polarización es conveniente hacer uso de dos aproximaciones, según que la onda se propague en una dirección apro

ximadamente paralela o perpendicular al vector B_{α} ; al caso de propagación casi paralela, le llamaremos "aproximación casi longitudinal" (CL) y al de la propagación casi perpendicular le llamaremos "aproximación casi transversal" (CT) .

La forma que tomarían las ecuaciones 2.1 y 2.2 para estas aproximaciones sería:

CL:

$$n_{CL}^2 \doteq 1 - X/(1-jZ \pm Y_L) \quad (2.3)$$

$$R_{CL} \doteq \pm j \quad (2.4)$$

CT:

$$n_{CT}^2 \doteq 1 - X/(1-jZ) \quad (\text{m. iónico}) \quad (2.5)$$

$$n_{CT}^2 \doteq 1 - X/\left[1-jZ-Y_T^2/(1-X-jZ)\right] \quad (\text{m. electrónico}) \quad (2.6)$$

$$R_{CT} \doteq 0 \quad (\text{m. iónico}) \quad (2.7)$$

$$R_{CT} \doteq \infty \quad (\text{m. electrónico}) \quad (2.8)$$

Las circunstancias que se tienen que cumplir para que estas aproximaciones sean posibles son:

$$CL: Y_T^4/4Y_L^2 \ll (1-X)^2 + Z^2 \quad (2.9)$$

$$CT: Y_T^4/4Y_L^2 \gg (1-X)^2 + Z^2 \quad (2.10)$$

Estudiaremos con detenimiento la aproximación CL que es la que tiene aplicación en nuestro caso.

La condición 2.9 presenta las mayores dificultades para su cumplimiento cuando $X=1$, si entonces se cumple, lo hará también para cualquier valor de X menor que 1. Para $X=1$ la 2.9 se reduce a

$$Y_T^4/4Y_L^2 \ll Z^2 ;$$

Podemos suponer que la desigualdad se cumple cuando un miembro es 10 veces mayor que el otro:

$$10Y_T^4/4Y_L^2 \leq Z^2 ,$$

es decir:

$$1.25 Y \text{ sen}^2 \theta / \cos \theta \leq Z ; \text{ o bien:}$$

$$1.25 B_{\sigma} e \text{ sen}^2 \theta / mw \cos \theta \leq \gamma / w$$

el valor del término $B_{\sigma} e/m$ es aproximadamente $1.4 \cdot 10^6 \text{ S}^{-1}$, mientras que a las alturas a que se produce $X=1$ el

valor de ϵ es inferior a $1.S^{-1}$ lo que conduciría a:

$$1.75 \cdot 10^6 \sin^2 \theta / \cos \theta \leq 1 \quad ;$$

que prácticamente exige que θ sea nulo, es decir que la propagación sea completamente longitudinal.

Ahora bien, es interesante estudiar el caso $X \leq 1 - Y_L$, correspondiente a toda la región en que se propaga el modo iónico. La desigualdad 2.9 queda:

$$Y_T^4 / 4Y_L^2 \ll Y_L^2 + Z^2 \quad ; \quad \text{y también:} \quad Y_T^4 / 4Y_L^2 \ll Y_L^2$$

se puede suponer que la desigualdad se cumple cuando el primer miembro es 10 veces menor que el segundo:

$$10 Y_T^4 / 4Y_L^2 \leq Y_L^2$$

de donde:

$$Y_T \leq 0.8 Y_L$$

es decir:

$$\sin \theta \leq 0.8 \cos \theta \quad ;$$

lo que supone, que para ángulos de propagación $\theta \leq 38^\circ$, podemos hacer uso de la aproximación CL, para densidades electrónicas que cumplan la condición $X \leq 1 - Y_L$.

En la base ESRANGE, la inclinación magnética es de 75° , esto significa que si el cohete se lanza casi verticalmente, el ángulo θ vale 15° , siendo por tanto aplicable la aproximación CL en esta base.

2.2.2. Deducción del índice de refracción de la Ionosfera en la aproximación casi longitudinal.

El índice de refracción complejo lo podemos descomponer en sus partes real e imaginaria de la forma:

$$n = \mu - j\chi \quad (2.11)$$

Por tanto, la fórmula 2.3 se convierte en:

$$(\mu - j\chi)^2 = 1 - X / (1 - jZ + Y_L)$$

ó bien:

$$(\mu - j\chi)^2 = 1 - X(1 + Y_L) / [(1 + Y_L)^2 + Z^2] - jXZ / [(1 + Y_L)^2 + Z^2] \quad (2.12)$$

que podemos expresar

$$(\mu - j\chi)^2 = a - jb$$

entonces:

$$\mu = \left\{ (1/2) \left[a(1+b^2/a^2)^{1/2} + a \right] \right\}^{1/2}$$

$$\chi = \left\{ 1/2 \left[a(1+b^2/a^2)^{1/2} - a \right] \right\}^{1/2}$$

como $b \ll a$ se puede poner:

$$\mu \doteq \left[a(1+b^2/4a^2) \right]^{1/2}$$

y también:

$$\mu \doteq a^{1/2} (1+b^2/8a^2)$$

donde el término $b^2/8a^2$ es despreciable frente a la unidad salvo para $X=1$

luego

$$\mu \doteq a^{1/2}$$

es decir, el valor de la parte real del índice de refracción en condiciones de aproximación CL será:

$$\mu \doteq \left\{ 1 - X(1 \pm Y_L) / \left[(1 \pm Y_L)^2 + Z^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.13)$$

Obsérvese que el valor de μ correspondiente al modo iónico (signo +), es mayor que el correspondiente - al modo electrónico.

De igual forma se deduce que

$$\gamma \doteq b/2a^{1/2}$$

ó bien

$$\gamma \doteq -XZ/2 \left[(1 \pm Y_L)^2 + Z^2 \right] \mu \quad (2.14)$$

de donde se desprende, que en la aproximación CL, el modo iónico se propaga con menos atenuación que el electrónico. Justificándose así la elección del modo iónico para la realización del experimento.

2.3. MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA EN LA IONOSFERA, A TRAVES DE LA COMPARACION DE LA VELOCIDAD DE FASE DE TRES ONDAS ELECTROMAGNETICAS, DE FRECUENCIAS ARMONICAS, QUE SE PROPAGAN EN EL MODO IONICO, ENTRE EL SUELO Y UN COHETE SONDA.

Como se ha visto en la sección 2.2, la parte real del índice de refracción que presenta la Ionosfera

para una onda electromagnética, es función de las cinco variables que se enumeran a continuación:

- 1ª.- Densidad electrónica local: N
- 2ª.- Frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas: ν
- 3ª.- Densidad de flujo del campo magnético terrestre: B_{θ}
- 4ª.- Angulo formado por el vector B_{θ} y la dirección de propagación de la onda: θ
- 5ª.- Frecuencia angular de la onda: w

De todas estas variables, sólo son desconocidas N y ν , ya que w la podemos elegir a nuestro capricho y B_{θ} y θ las podemos medir mediante un magnetómetro e incluso las podemos calcular teóricamente.

Si se pudiese deducir por cualquier medio la parte real del índice de refracción de la Ionosfera a dos frecuencias diferentes, se tendría un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$\mu_1 = \mu_1(N, \nu)$$

$$\mu_2 = \mu_2(N, \nu)$$

que permitiría el cálculo de las dos incógnitas N y ν .

Por tanto, el problema de la medida de la densidad electrónica local en la Ionosfera se reduce a la -

determinación del índice de refracción de esta, a dos -
frecuencias diferentes.

2.3.1. Medida del índice de refracción de la Ionosfera,
para dos frecuencias diferentes.

Si se trasmite desde el suelo una onda electro-
magnética, la fase de esta, tal como se recibe en un co-
hete que se aleja de la tierra será:

$$\phi = \omega t - (\omega/c) \int_0^s \mu ds \quad (2.15)$$

en donde:

$$v = ds/dt$$

c = velocidad de la luz en el vacío

s = trayectoria seguida por la onda en el espacio

y la frecuencia angular instantánea, será:

$$\Omega = d\phi/dt$$

$$\Omega = \omega - (\omega/c) \left(\mu ds/dt + \int_0^s (\partial\mu/\partial t) ds \right)$$

$$\Omega = \omega \left(1 - \mu v/c - (1/c) \int_0^s (\partial\mu/\partial t) ds \right)$$

En el caso de transmitir dos ondas, de frecuencias f_1 y f_2 ($f_2=4f_1$) y de acuerdo con la figura 2.1, podemos escribir

$$F_1=f_1\left[1-\mu_1v \cos(a-\Delta a)/c-(1/c)\int_0^s (\partial\mu_1/\partial t)ds\right]$$

$$F_2=f_2\left[1-\mu_2v \cos a/c -(1/c)\int_0^s (\partial\mu_2/\partial t)ds\right]$$

en donde F_1 y F_2 son las frecuencias instantáneas de las ondas recibidas en el cohete.

Realizando en el extremo receptor la diferencia $B = 4F_1-F_2$, tendremos:

$$B = (4f_1/c)\left[\mu_2v \cos a-\mu_1v \cos(a-\Delta a) + \int_0^s (\partial\mu_2/\partial t)ds - \int_0^s (\partial\mu_1/\partial t)ds\right] \quad (2.16)$$

que podemos poner en la forma:

$$B = (4f_1v \cos a/c)\left[\mu_2-\mu_1(1+\Delta a \operatorname{tg} a)\right] + f_E \quad (2.17)$$

en donde:

$$f_E = (4f_1/c)\left[\int_0^s (\partial\mu_2/\partial t)ds - \int_0^s (\partial\mu_1/\partial t)ds\right] \quad (2.18)$$

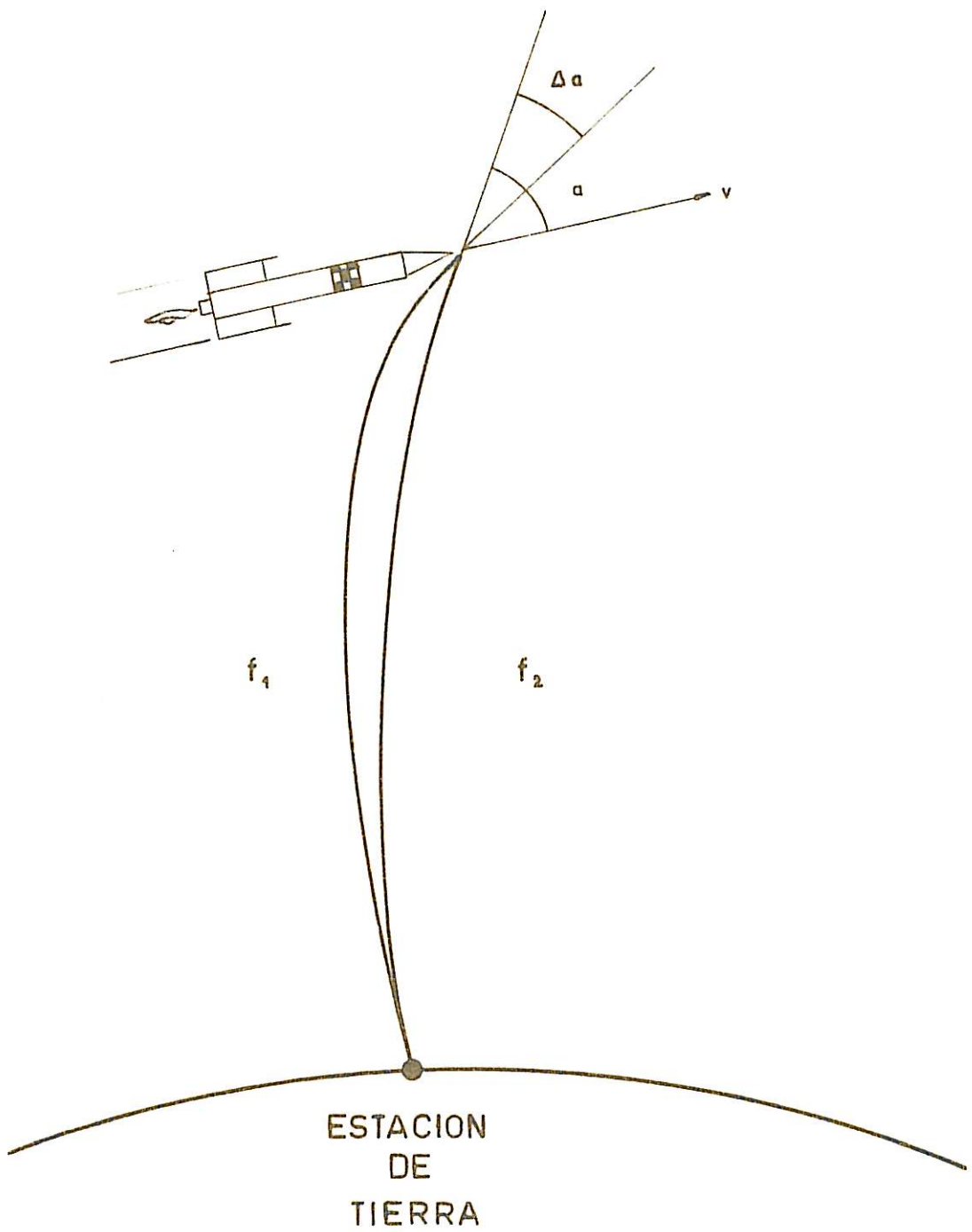


FIG. 2.1

habiendo supuesto para esta simplificación que el ángulo Δa es muy pequeño.

El término f_E representa la variación temporal de los índices de refracción de la Ionosfera. Se puede considerar prácticamente nulo, ya que el tiempo que dura el lanzamiento es muy pequeño; pero como seguridad, conviene realizar una serie de ionogramas antes y después de este, para comprobar que no se ha producido ninguna variación temporal. En el caso extrañísimo de que esto hubiese sucedido, se tratará de evaluar el término f_E a partir de los ionogramas.

El término $\Delta a \operatorname{tg} a$ es despreciable en la parte ascendente de la trayectoria, ya que se puede considerar que la línea que une al cohete con los transmisores es paralela al gradiente de densidad electrónica, siguiendo las ondas esta línea, sin producirse ninguna curvatura de los rayos. No ocurre así en la parte descendente de la trayectoria, ya que al ser la dirección de propagación bastante oblicua la propagación de las ondas se produce a lo largo de una línea curva. La determinación de Δa para la parte descendente de la trayectoria, exige el conocimiento detallado de la Ionosfera en un volumen considerable, lo que no es posible; se procede entonces a despreciar el término $\Delta a \operatorname{tg} a$ en los cálculos, lo -

que conduce a medidas de densidad erróneas, tanto más, -
cuanto mayor sea el alcance horizontal del cohete; en -
consecuencia, las medidas correspondientes al descenso -
sólo serán tomadas en cuenta como comprobación cualitativ
va de las realizadas durante el ascenso.

Con estas simplificaciones la ecuación 2.16 -
queda reducida a:

$$B = (4f_1 v \cos a/c) (\mu_2 - \mu_1) \quad (2.19)$$

que relaciona inequívocamente μ_1 y μ_2 , ya que f_1 es conoq
cida, mientras que v , $\cos a$ y B se miden durante toda la
duración del lanzamiento.

Se puede suponer que una onda de frecuencia -
igual a 80 MHz, se propaga inafectada a través de la Io-
nosfera, lo que equivale a decir que para ella el índice
de refracción es la unidad.

Por tanto, utilizando la onda de 80 MHz como -
patrón, podemos calcular el valor del índice de refrac-
ción para 20 MHz, cuando se comparan las frecuencias insg
tantáneas de las ondas de 80 MHz y 20 MHz, previamente -
multiplicada por 4.

Idénticamente, se puede calcular el valor del índice de refracción para 5 MHz, una vez obtenido el correspondiente a 20 MHz, por comparación de las frecuencias instantáneas de las ondas de 20 MHz y 5 MHz, previamente multiplicada por 4.

2.3.2. Cálculo de la densidad electrónica y frecuencia efectiva de colisión de los electrones con las demás partículas.

Hemos visto que la parte real del índice de refracción iónico en la aproximación CL viene dado por la ecuación 2.13:

$$\mu \doteq \left\{ 1 - X(1 + Y_L) / \left[(1 + Y_L)^2 + Z^2 \right] \right\}^{1/2}$$

Tanto para 80 MHz como para 20 MHz podemos desprestigiar el término Z^2 frente a $(1 + Y_L)^2$ ya que en el caso más desfavorable $Z^2 \leq 1/2500$, mientras que $(1 + Y_L)^2 \geq 1$. Así que para 20 MHz emplearemos la forma más simplificada:

$$\mu_{20} \doteq \left[1 - X / (1 + Y_L) \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

Particularizando la ecuación 2.19 para 20 MHz

y 80 MHz, tenemos:

$$B_{20/80} = (80 \cdot 10^6 v \cos a/c) (\mu_{80} - \mu_{20}) \quad (2.21)$$

y eliminando μ_{20} entre 2.20 y 2.21:

$$X = \left[3'75(1+Y_L)^2 B_{20/80} / v \cos a \right] \left[2 - 3'75 B_{20/80} / v \cos a \right]$$

o bien:

$$N = \left[37'2 \cdot 10^{12} (1+Y_L)^2 B_{20/80} / v \cos a \right] \left[1 - 1'88 B_{20/80} / v \cos a \right] \quad (2.22)$$

ecuación en la que todos los términos son conocidos, ya que se miden durante el lanzamiento.

En el apartado anterior, se ha supuesto que el valor del índice de refracción es la unidad; ahora bien, esto no es rigurosamente cierto, siendo causa de que la fórmula 2.22 presente un error por defecto de un 6'2%, por tanto el valor real de la densidad electrónica vendrá dado por:

$$N = \left[4 \cdot 10^{13} (1+Y_L)^2 B_{20/80} / v \cos a \right] \left[1 - 1'88 B_{20/80} / v \cos a \right] \quad (2.23)$$

Como se ha expuesto, la pareja de frecuencias 20 MHz/80 MHz no es muy sensible y sólo permite medir densidades electrónicas superiores a $2 \cdot 10^9$ electrones/m³.

La pareja de frecuencias 5 MHz/20 MHz, es sensible a densidades electrónicas comprendidas entre 10^8 - e1/m³ y $2 \cdot 10^{11}$ e1/m³; pero en este caso ya no es lícito - despreciar la influencia de la frecuencia de colisión de los electrones con las demás partículas ν . No permite - esta pareja una determinación directa de N, sino que da una relación entre ν y N.

Con el uso de la pareja 20 MHz/80 MHz se ha obtenido el valor de N en el margen superior a $2 \cdot 10^9$ e1/m³; es posible, por tanto, determinar el valor de ν para la parte de trayectoria correspondiente a las densidades - electrónicas comprendidas entre $2 \cdot 10^9$ e1/m³ y $2 \cdot 10^{11}$ e1/m³. La ecuación que da el valor de ν se puede deducir de la 2.13 y sería:

$$\nu = 10^{-4} N / (1 - \mu_{20}^2) - \pi \cdot 10^7 (1 + Y_L)^2 \quad (2.24)$$

Si se representa en papel semi-logarítmico el valor de ν en función de la altura, la curva obtenida se aproxima sensiblemente a una recta, de forma que por ex-trapolación de esta se puede conseguir el valor aproxima

do de ν para la parte de la trayectoria correspondiente a las densidades electrónicas inferiores a $2 \cdot 10^9 \text{el/m}^3$.

La distribución de las densidades electrónicas inferiores a $2 \cdot 10^9 \text{el/m}^3$, se calcula a partir de la información suministrada por la pareja de frecuencias 20 MHz / 80 MHz, en combinación con el valor extrapolado de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas para la altura correspondiente.

2.3.3. Efecto del giro del cohete alrededor de su eje.

Las antenas del cohete, están polarizadas en un plano. Cuando el cohete gire alrededor de su eje, también lo hará el plano de polarización, alterando la frecuencia instantánea de las ondas recibidas de la forma

$$F'_1 = F_1 + f_G$$

$$F'_2 = F_2 + f_G$$

donde F'_1 y F'_2 son las frecuencias instantáneas alteradas y f_G es la frecuencia de giro del cohete.

Al multiplicar F'_1 por 4 y hallar la diferencia tendremos:

$$4F'_1 - F'_2 = B + 3f_G$$

Es decir, la diferencia de frecuencias aparente difiere de la real en $3f_G$, bien por exceso o bien por defecto, dependiendo de que el sentido de giro de la polarización de las ondas y el del cohete sean contrarios o iguales.

El efecto del giro del cohete aparecerá clarísimamente durante el tiempo en que el cohete está fuera de la Ionosfera.

Al efectuar el análisis de resultados hay que tener en cuenta esta alteración para su corrección, pudiéndose hacer esta a partir de los datos de actitud, su ministrados por el magnetómetro y sensor solar.

CAPITULO 3

PROYECTO Y REALIZACION DEL SISTEMA DE MEDIDA PROPIO

3.1. TRASMISION

3.1.1. Cálculo de la Potencia a transmitir.

Para calcular el campo necesario a lo largo de la trayectoria del cohete, supondremos que el nivel de ruido radioeléctrico es igual al que se encuentra en el suelo en áreas suburbanas. En las frecuencias que nos interesan, los niveles de ruido en una banda de 15 KHz son (35):

$$\text{en } 5 \text{ MHz : } E = 40 \mu\text{V/m}$$

$$\text{en } 20 \text{ MHz : } E = 20 \mu\text{V/m}$$

$$\text{en } 80 \text{ MHz : } E = 14 \mu\text{V/m}$$

este ruido es únicamente debido a la acción humana, encontrándose muy por bajo de los ruidos atmosférico y cósmico.

Se puede suponer que la máxima atenuación sufrida por una onda de 5 MHz al atravesar la Ionosfera en un trayecto de unos 200 km es de 10 dB (36), mientras -

que las ondas de 20 MHz y 80 MHz se propagan sin atenuación prácticamente.

Aunque bastaría un margen menor, hemos supuesto que la relación Señal/Ruido debe ser de 20 dB, lo cual obligaría a que el campo eléctrico en las inmediaciones del cohete fuera:

$$\text{en } 5 \text{ MHz : } E = 400 \text{ } \mu\text{V/m}$$

$$\text{en } 20 \text{ MHz : } E = 200 \text{ } \mu\text{V/m}$$

$$\text{en } 80 \text{ MHz : } E = 140 \text{ } \mu\text{V/m}$$

Se ha supuesto que estos campos han de ser creados a una altura de 300 km para las ondas de 20 MHz y 80 MHz (altura muy superior a la alcanzada por los cohetes que normalmente se utilizan); mientras que para la onda de 5 MHz, se ha contado con una altura máxima de 200 km, que generalmente no es alcanzada por esta onda por sufrir reflexión a alturas inferiores.

Para que se cumplan estos requisitos y suponiendo que la ganancia de las antenas emisoras es de 6 dB, las potencias a transmitir deben ser:

$$\text{en } 5 \text{ MHz } \quad 830 \text{ W}$$

$$\text{en } 20 \text{ MHz } \quad 190 \text{ W}$$

$$\text{en } 80 \text{ MHz } \quad 95 \text{ W}$$

Por tanto hemos empleado unos transmisores con

las potencias siguientes: 1000 W en 5 MHz , 200 W en 20 MHz y 100 W en 80 MHz.

Como todos los cálculos anteriores han sido hechos con un margen de seguridad grande, se sabe que estas potencias están muy por encima de las estrictamente necesarias, pero se prefiere que así sea, porque esto aumenta la protección contra posibles interferencias creadas por otros transmisores, trabajando en las mismas frecuencias.

Los transmisores son totalmente convencionales, no nos detendremos por tanto en su estudio detallado. En la figura 3.1 aparece el esquema de bloques general.

3.1.2. Oscilador.

El oscilador es de tipo comercial y se ha seleccionado el de mayor estabilidad entre los fácilmente disponibles en el mercado.

Utiliza un cristal de corte B-T en combinación con un transistor de silicio, todo el circuito está encerrado en un horno. Dispone de ajustes grosero y fino de frecuencia, para compensar el envejecimiento durante 20 años. A continuación se detallan sus características:

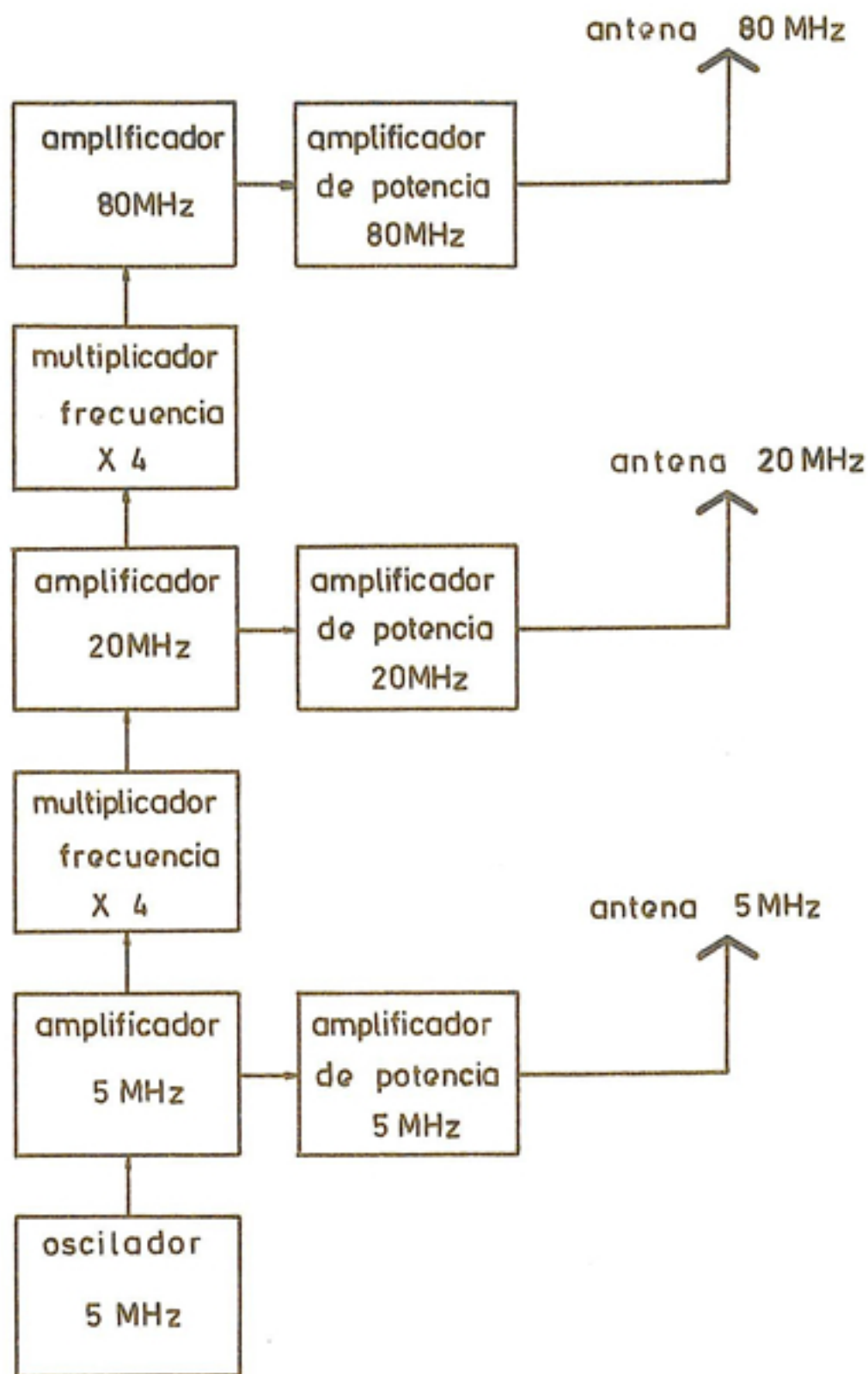


DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS TRANSMISORES

FIG. 3.1

Marca	MARCONI
Tipo	F 3121-02
Frecuencia	5 MHz
Margen de temperatura ambiente	+ 10°C a + 40°C
Estabilidad a corto plazo	Mejor que ± 2 en 10^9 durante 1 segundo. Con temperatura y tensión de alimentación constante.
Salida	250 mV ef. sobre 10 KOhms.
Alimentación	20 V \pm 1'5% ; 350 mA.

El oscilador se pone en funcionamiento por lo menos 24 horas antes de la primera oportunidad de lanzamiento, manteniéndose en este estado hasta el fin de la "campana".

3.1.3. Amplificadores y multiplicadores.

Los amplificadores y multiplicadores han sido realizados con tubos de vacío trabajando en clase C. Se ha cuidado especialmente la estabilidad de la fase, cerciorándose de que permanece constante para los márgenes de temperatura ambiente y tensión de alimentación previstos. Así mismo se ha cuidado de que los armónicos en 20 y 80 MHz fueran de muy pequeña amplitud, con el fin de evitar interferencias de unos transmisores con otros. En la

figura 3.2 se puede ver el conjunto de oscilador, multiplicadores y amplificadores, así como la caseta en que están instalados y la antena de 80 MHz próxima a ésta, instalados en ESRANGE.

3.1.4. Antenas.

Las antenas a utilizar en la latitud de la base de lanzamiento ESRANGE, ($67^{\circ}75'N$) deben radiar una onda polarizada circularmente. Para conseguir tal polarización se ha utilizado un par de dipolos en posición horizontal, de media longitud de onda, cruzados y excitados por tensiones de radio-frecuencia defasadas en $\pi/2$. Con el fin de aumentar su ganancia, se ha instalado a una distancia de 0.45λ , sobre el suelo, una rejilla metálica que actúa como reflector.

En la figura 3.3 se puede ver la antena de 5 MHz. Los elementos de soporte son 5 postes de madera creosotada empotrados en el suelo, los elementos radiantes son cables de cobre y acero tendidos entre los postes. En la figura 3.4 aparecen las antenas de 20 MHz y 80 MHz. Esta última ha sido montada sobre un bastidor de madera para evitar que quedase enterrada por las nevadas invernales y para poder orientar su dirección de máxima ganancia hacia el punto aproximado de apogeo del cohete.

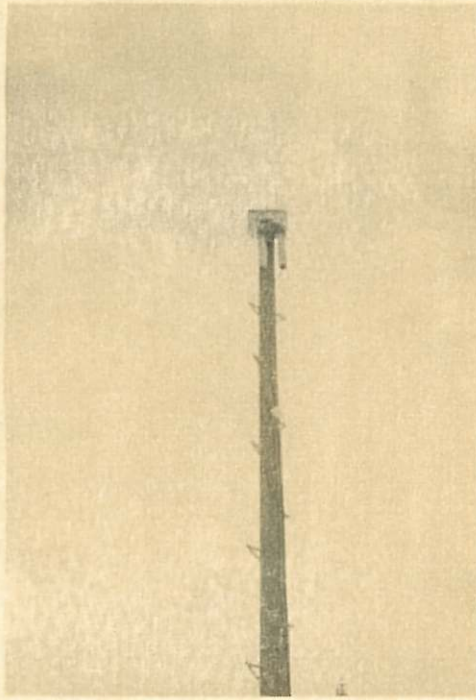


TRASMISORES



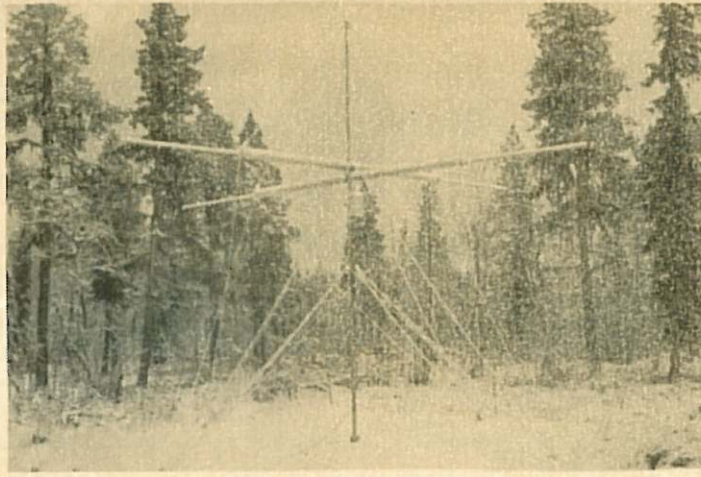
CASETA DE TRASMISORES

FIG . 3.2



ANTENA TRASMISORA DE 5 MHz

FIG. 3.3



ANTENA TRASMISORA DE 20 MHz



ANTENA TRASMISORA DE 80 MHz

FIG. 3.4

En la figura 3.4B aparece el diagrama de bloques del sistema de acoplo de las antenas.

3.1.5. Sistema de Control.

Como la estación trasmisora está situada bajo la trayectoria del cohete, por razones de seguridad no puede ser manejada directamente por un experimentador. En vista de esto se ha realizado un control remoto, que une la estación con la sala de operaciones de la base mediante un cable telefónico de 6 pares. Con él se pueden poner en marcha los transmisores y tener una indicación de la potencia de salida.

3.2. RECEPCION

3.2.1. Disposición general del sistema receptor.

Según el planteo teórico de la medida, el sistema receptor consistiría simplemente en tres amplificadores (dos de ellos seguidos por multiplicadores de frecuencia $\times 4$ y $\times 16$) y en dos comparadores de fase. Ahora bien, un esquema tan sencillo presenta dificultades de orden práctico, como el peligro de oscilación del amplificador de 80 MHz, la construcción de filtros eficaces a muy altas frecuencias y realización de comparación de fa

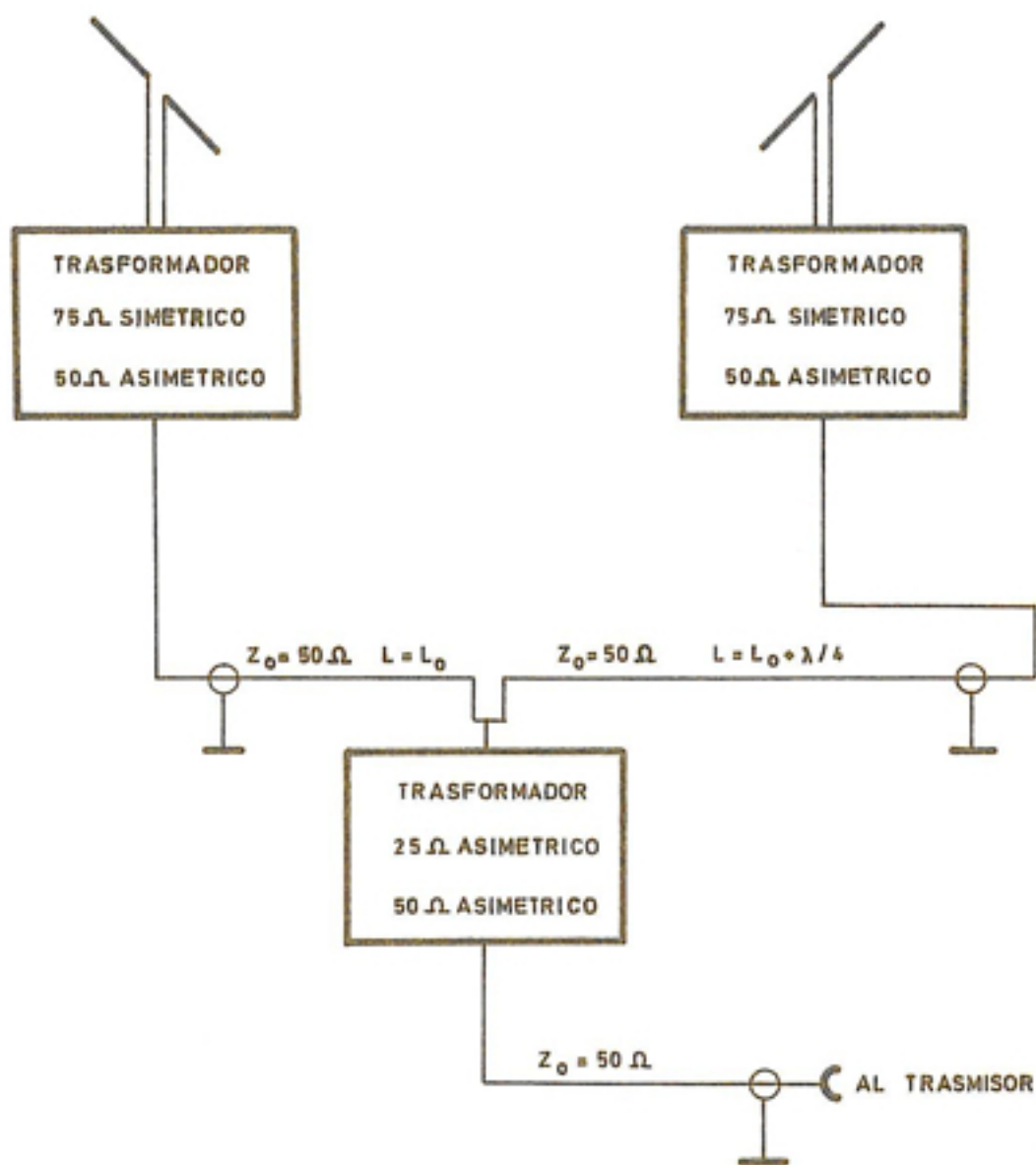


DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS ANTENAS TRASMISORAS

FIG. 3.4. b

se a 80 MHz.

Se ha preferido realizar un sistema con oscilador local y frecuencias intermedias, cuyo esquema de bloques puede verse en la figura 3.5.

El oscilador local se podría haber realizado en 69'3 MHz, en 17'3 MHz, o en 4'44 MHz, generando las demás frecuencias por multiplicación o división. Se ha elegido precisamente 17'3 MHz porque el fabricante de los cristales de cuarzo garantizaba menor variación de la frecuencia por choque y vibración en este margen. Las frecuencias intermedias están elegidas de forma que se pueda hacer uso de filtros de cristal comerciales de 10'7 MHz.

3.2.2. Sensibilidad.

Como se ha visto en el apartado 3.1.1, se espera que el nivel de campo electromagnético en las proximidades de los receptores sea superior a $400 \mu\text{V/m}$, $200 \mu\text{V/m}$ y $140 \mu\text{V/m}$ en 5 MHz, 20 MHz y 80 MHz, respectivamente. Por tanto no es necesario disponer de receptores muy sensibles. No obstante, para prevenir cualquier fallo de las antenas por desintonía a causa del plasma, se ha buscado la mayor sensibilidad posible. Se ha logrado que la relación señal-ruido, sea de 12 dB para una tensión de -

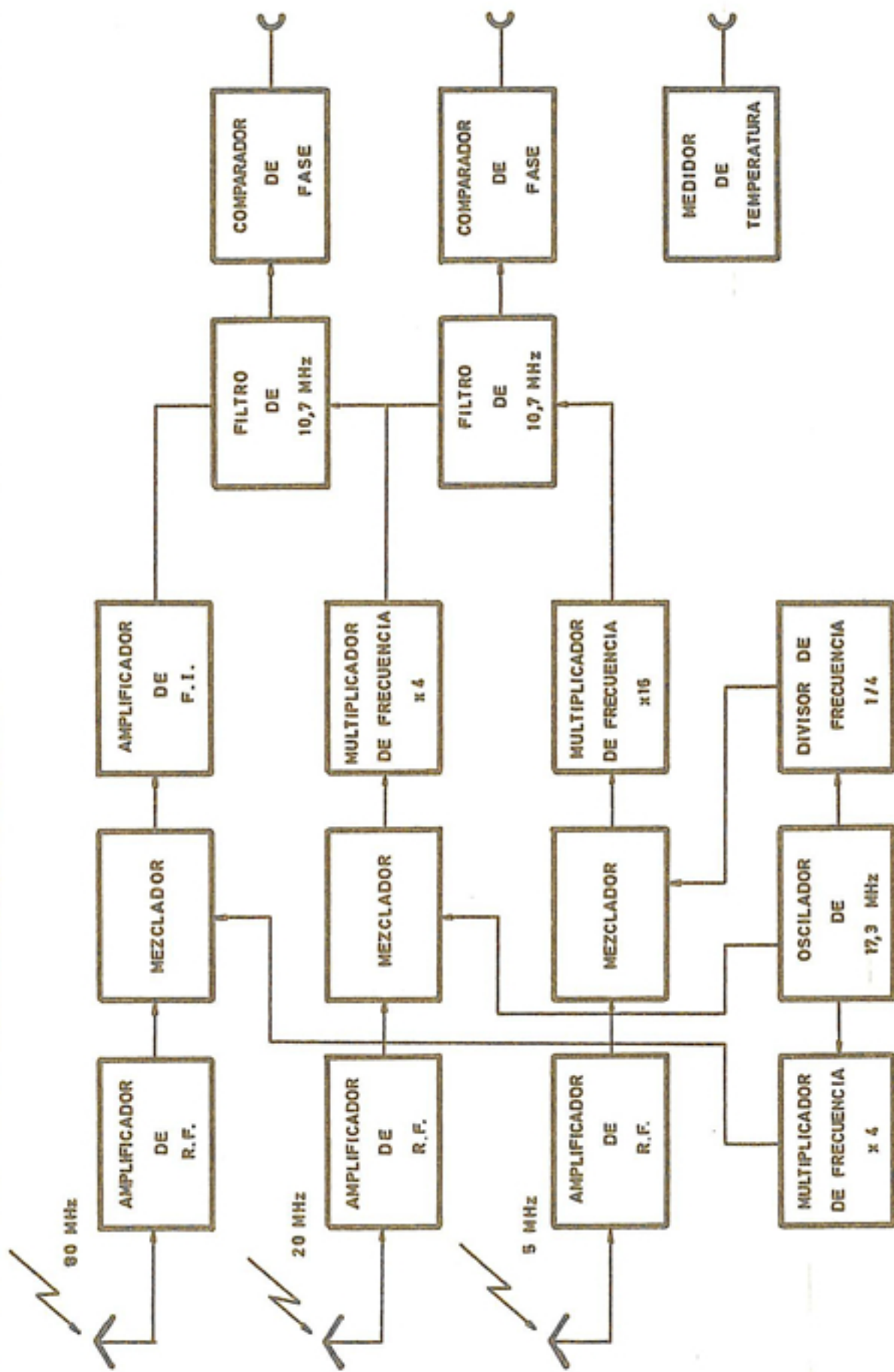


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL RECEPTOR

FIG. 3.5

entrada de $1 \mu\text{V}$ y un ancho de banda de 15 KHz.

3.2.3. Ancho de banda.

La desviación de frecuencia instantánea respecto de la nominal, es debida al efecto Dòppler. Normalmente, la velocidad de los cohetes-sonda es aproximadamente de 1 km/s y como caso límite supondremos que la velocidad es de 3 km/s; en estas condiciones, la desviación máxima de frecuencia a los 80 MHz sería de 800 Hz. Por tanto, la banda estrictamente necesaria es de 1600 Hz.

Las frecuencias de 5 MHz, 20 MHz y 80 MHz, suelen usarse habitualmente como frecuencias patrón, sobre todo 5 MHz. Para prevenir que en alguna base de lanzamiento no sea posible transmitir por esta razón las frecuencias elegidas, se ha tomado un ancho de banda bastante mayor: 15 KHz, lo que permite que la frecuencia del oscilador de 5 MHz de los transmisores varíe ± 440 Hz.

3.2.4. Realización.

Por estar el equipo destinado a ser transportado por un cohete, las exigencias de robustez mecánica son especialmente duras.

La caja que encierra al sistema electrónico está constituida por dos piezas únicamente; una es un blo-

que de duraluminio, que ha sido fresado para recibir en su interior a los circuitos electrónicos, la otra es una tapa plana que cierra herméticamente. Todo el espacio no utilizado dentro de la caja, ha sido relleno con goma de silicona flexible y transparente permitiéndose una fácil inspección ocular del circuito y el acceso eventual a cualquier componente, ya que esta goma puede ser corta da fácilmente con un cortaplumas, siendo posible volver a llenar después el hueco practicado.

Se ha pretendido reducir al mínimo el número de circuitos con componentes de ajuste mecánico, para evitar la posible variación de éste. Ha sido posible realizar todo el sistema con sólo unas pocas inductancias variables, gracias al uso de circuitos integrados de último modelo. Estos circuitos son fabricados por la firma PLESSEY para aplicación a equipos militares; su característica más importante es que la resistencia de salida es de sólo 20 Ohms y la de entrada de 10 KOhms, presentando una ganancia en tensión variable entre 10 y 50 según el tipo. Por tanto pueden ser conectados en cascada sin necesidad de acoplo inter-etapa.

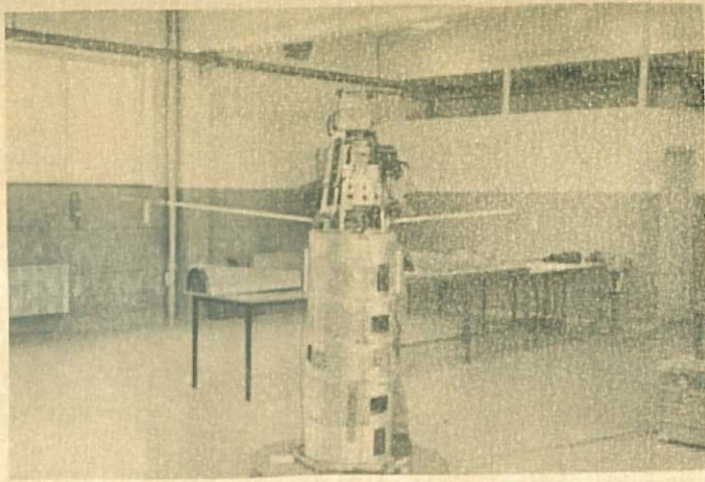
3.2.5. Antenas.

El principal problema en el desarrollo de las

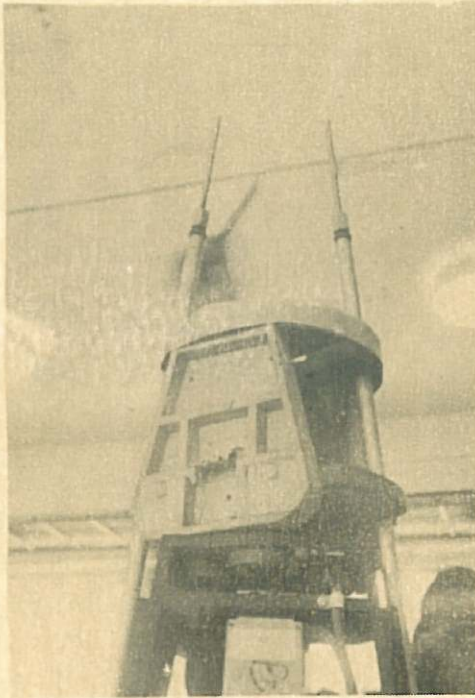
antenas receptoras, ha consistido en lograr unas de pequeñas dimensiones y buen rendimiento.

En el cohete S46B se han utilizado las que se ven en la figura 3.6 . La de 5 MHz consiste en un cuadro con diez espiras de hilo de cobre plateado, devanadas sobre un marco de madera de balsa, de dimensiones 250 mm x 150 mm x 30 mm. Para 20 MHz y 80 MHz se ha utilizado una antena común, constituida por un dipolo (en $\lambda/2$ para 80 MHz). En la figura 3.7 puede verse el sistema de adaptación; la resonancia a ambas frecuencias se logra con las bobinas y condensadores L_1 , L_2 , C_1 , C_2 ; después se hace una adaptación a línea asimétrica de 50 Ohms, mediante un balun de banda ancha, bobinado sobre un núcleo de ferrita de sección en forma de 8; la separación se realiza mediante secciones de cable coaxial de 50 Ohms de longitudes convenientes.

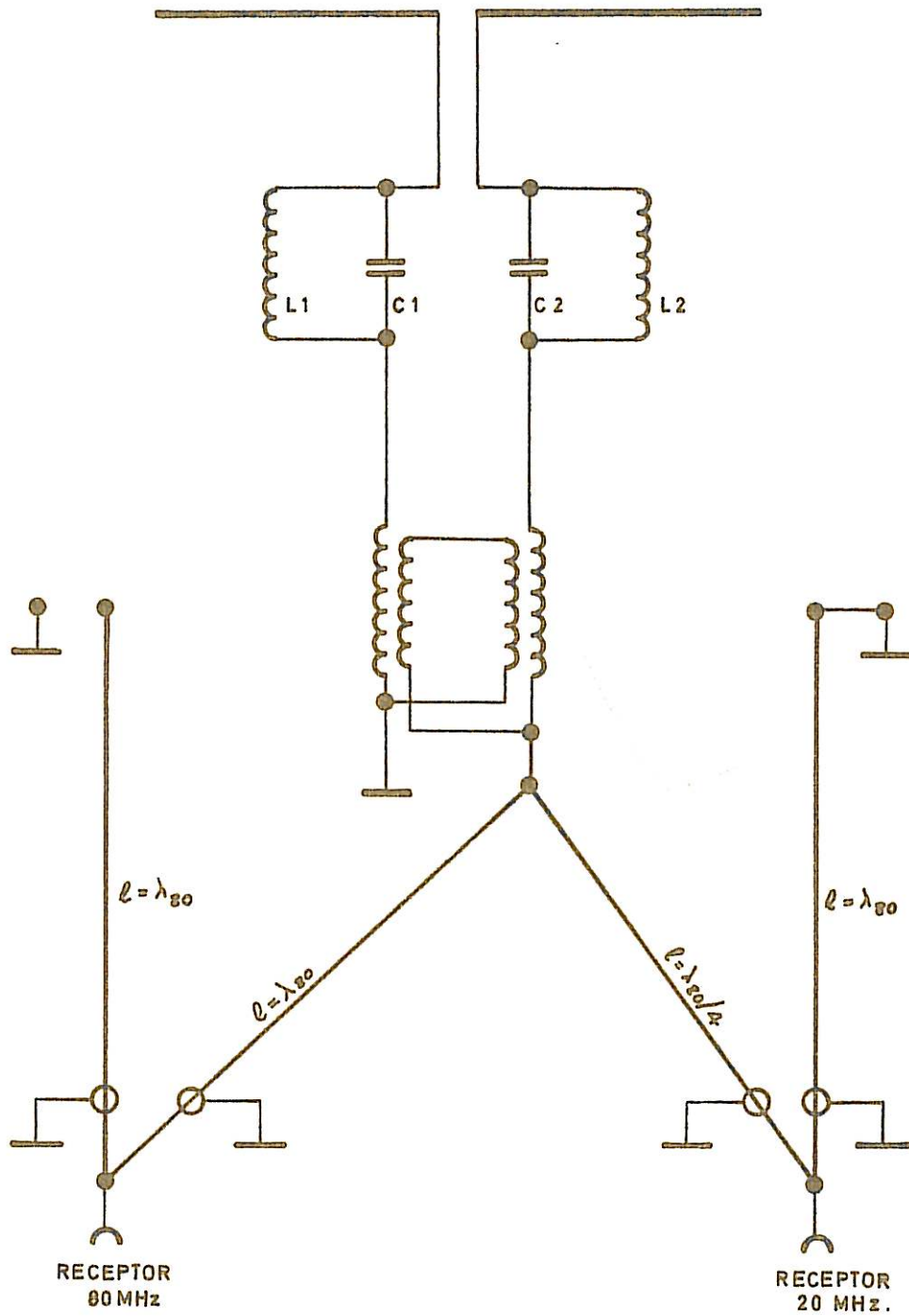
Posteriormente, se ha desarrollado un conjunto de antenas, que juzgamos muy superiores eléctrica y mecánicamente; pero no ha sido posible instalarlas en el S46B, por estar éste completamente terminado cuando se dispuso de ellas. Estas antenas consisten en un monopolo corto conectado directamente a un amplificador de alta impedancia.



ANTENA RECEPTORA DE 20 MHz Y 80 MHz



ANTENA RECEPTORA DE 5 MHz



SISTEMA DE ACOPLO DE LA ANTENA RECEPTORA DE 20 MHz Y 80 MHz

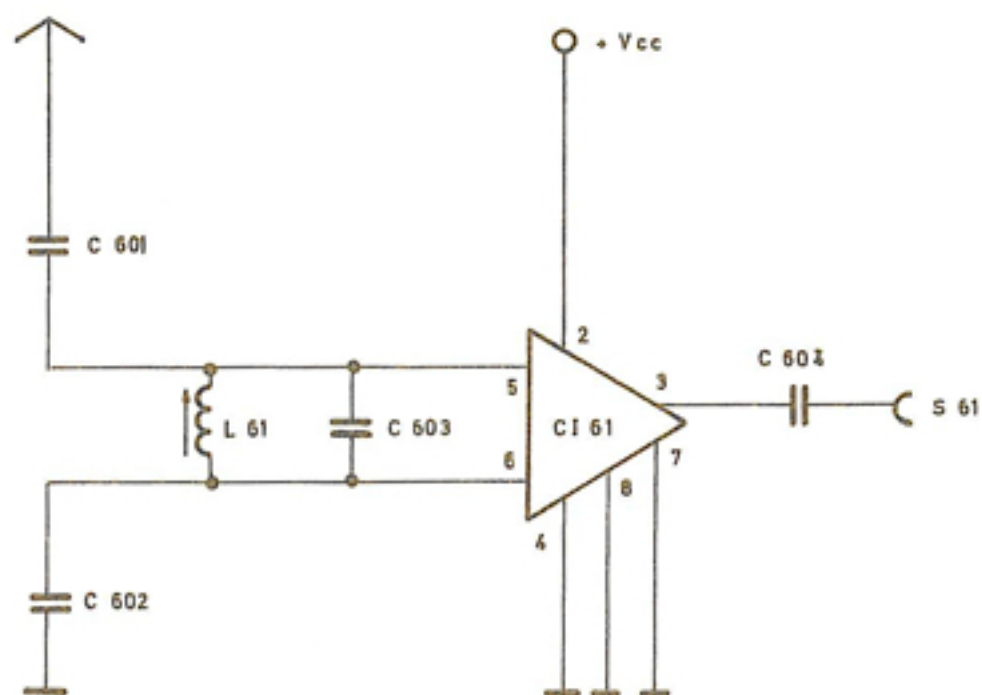
FIG. 3.7

Una antena muy corta eléctricamente tiene una ganancia sólo 0'4 dB inferior a la de un dipolo resonante en $\lambda/2$. Pero no es útil porque presenta una reactancia en serie de valor muy elevado y para llevarla a resonancia, habría que alcanzar un Q exageradamente alto. Pues bien, al conectar un amplificador con impedancia de entrada mayor que la reactancia serie de la antena, esta será despreciable frente a ella y la antena resulta tan eficaz como cualquier otra de dimensiones comparables a la longitud de onda.

En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se pueden ver los esquemas de estas antenas. El monopolo puede estar formado por un trozo de cuerda de piano de unos 20 cm de largo y 1'5 mm de diámetro, saliendo al exterior del cuerpo del cohete, que actuará de contraantena. El circuito integrado empleado es un Plessey SL610, con una resistencia de entrada de 10 KOhms y una ganancia en tensión de 10; a la entrada se ha colocado un circuito resonante para evitar el efecto de la capacidad de entrada del amplificador y para limitar el ancho de banda.

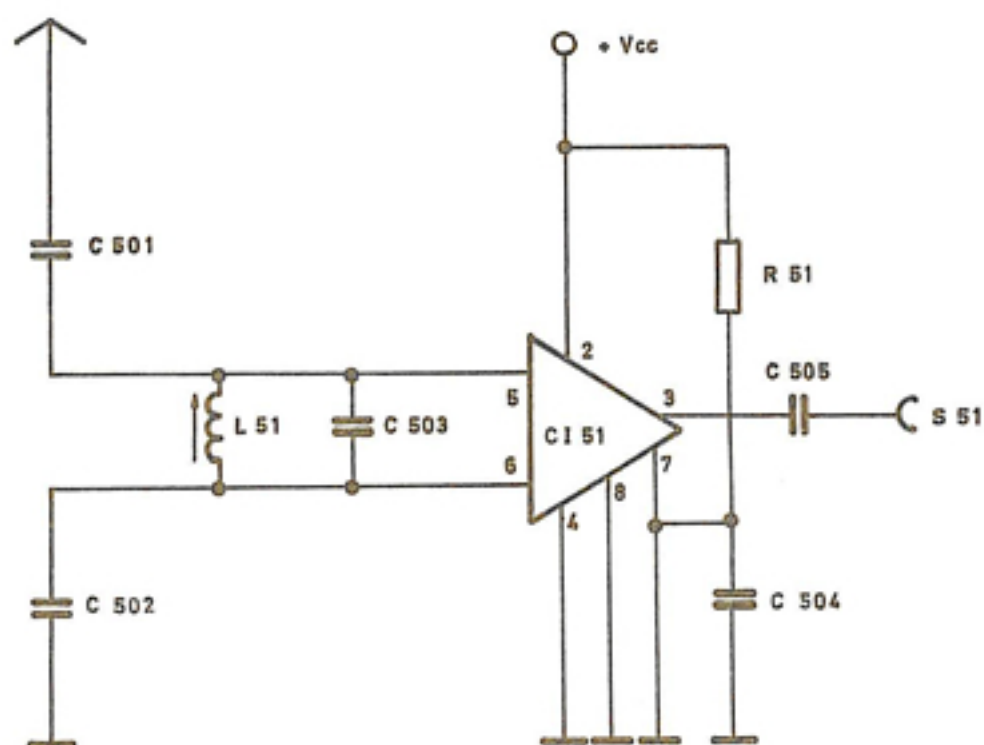
3.2.6. Oscilador local.


En la figura 3.11 se puede ver el esquema del oscilador. La frecuencia de oscilación depende ligeramen

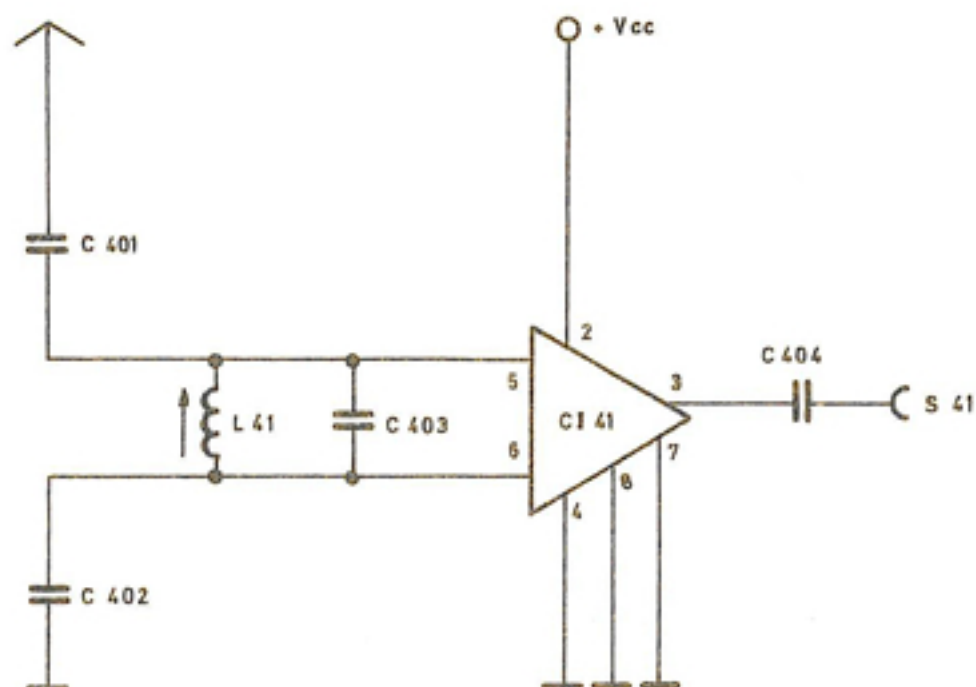


ANTENA ACTIVA DE 80 MHz

Marca	Denominación	Cant.	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Modificado	Fecha	Nombre	Firma	 CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS LEONARDO TORRES QUEVEDO			
Dibujado		MARINA					
Proyectado		MONTOYA	<i>Montoya</i>				
Comprob.	1-6-70						
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO			PROYECTO	FIG.		
				N AF 1.11	3.8		



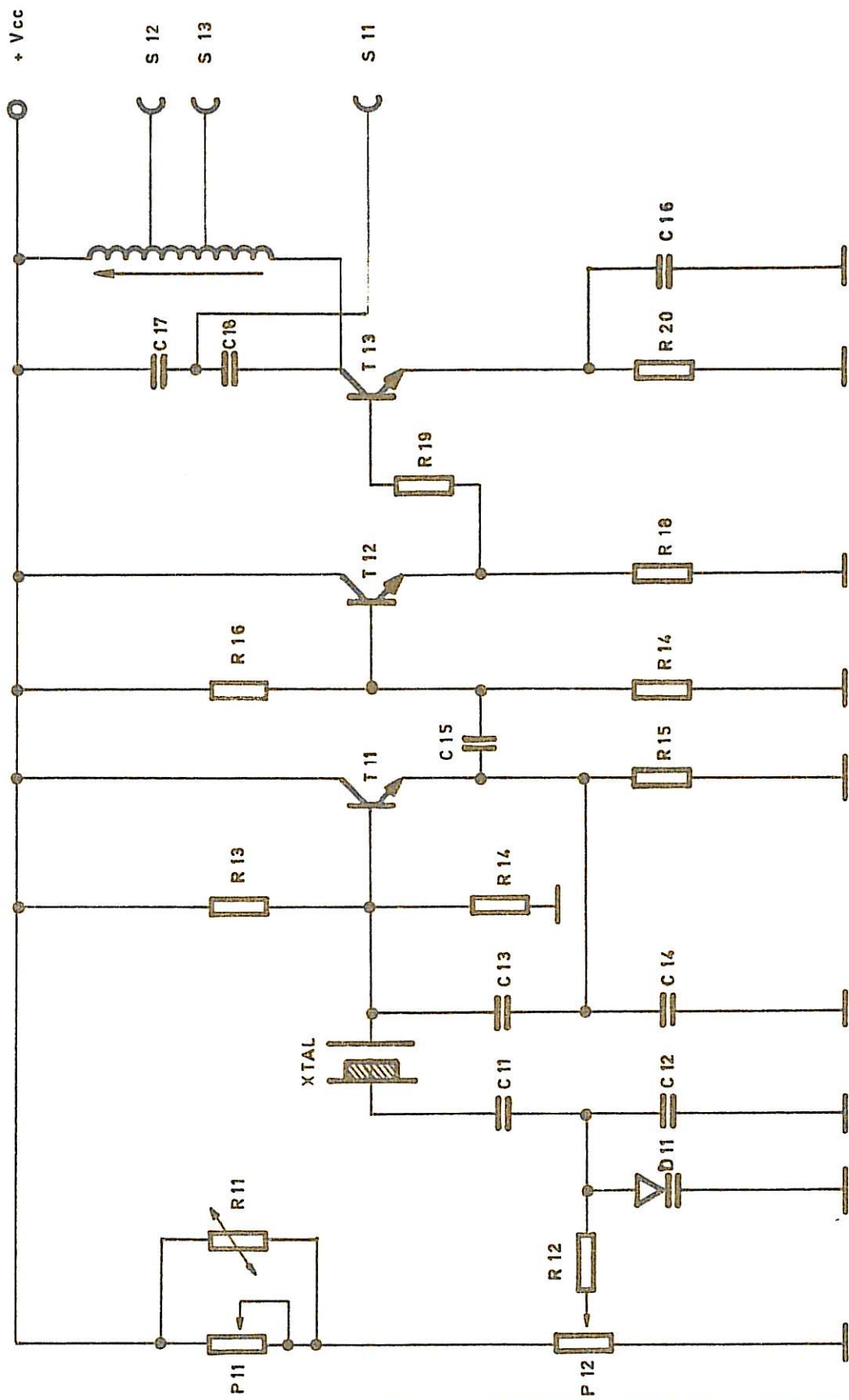
ANTENA ACTIVA DE 20 MHz					Cant.	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Marca	Denominación									
Modificado	Fecha	Nombre	Firma		 CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS LEONARDO TORRES QUEVEDO					
Dibujado		MARINA								
Proyectado		MONTOYA		<i>A. Montoya</i>						
Comprob	1-6-70				ESCALA	EQUIPO EMBARCADO			PROYECTO N.º AF 1.11	FIG. 3.9




ANTENA ACTIVA DE 5 MHz					Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Marca	Denominación									
Modificado	Fecha	Nombre	Firma							
	Dibujado	MARINA								
	Proyectado	MONTOYA	<i>[Signature]</i>							
	Comprob									
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					PROYECTO N.º AF 1.11			FIG. 3.10	



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FISICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**



OSCILADOR DE 17,5 MHz

Marca	Denominación	Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Modificado	Fecha	Nombre	Firma	 CENTRO DE INVESTIGACIONES FISICAS LEONARDO TORRES QUEVEDO			
Dibujado		MARINA					
Proyectado		MONTOYA	<i>[Signature]</i>				
Comprob	1-6-47						

ESCALA	EQUIPO EMBARCADO	PROYECTO N.º AF 1.11	FIG. 3.11
--------	------------------	-------------------------	--------------

te de la capacidad del varicap D11, de modo que se puede hacer un ajuste fino de ésta con el potenciómetro P12

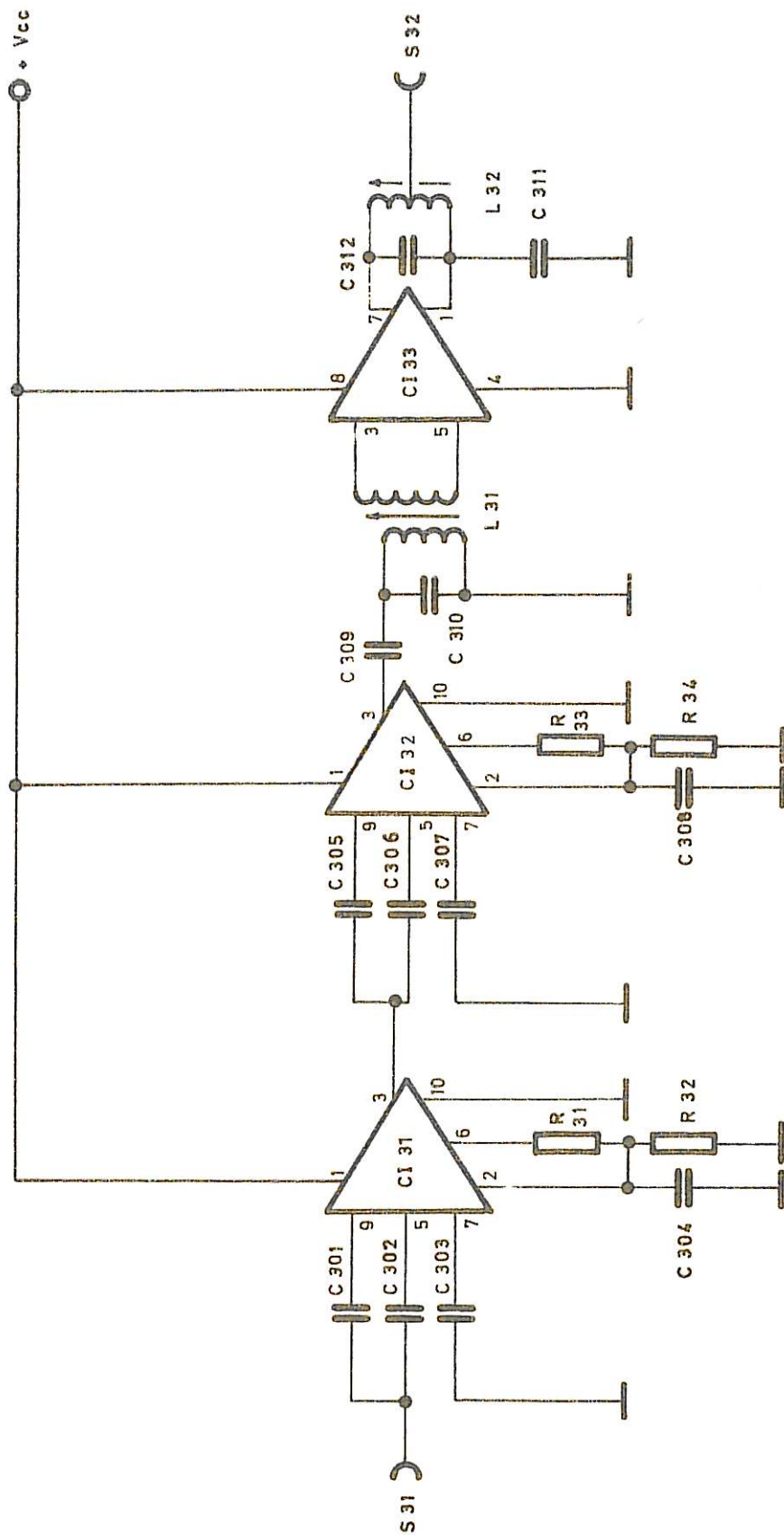
Para mejorar la estabilidad de frecuencia, se ha incluido un control automático con la temperatura mediante P11 y R11, lográndose una estabilidad de 1'2 partes en 10^6 en el margen de 10°C a 70°C . Se espera que la temperatura del circuito esté siempre comprendida entre 20°C y 50°C , con lo que los cambios de frecuencia serían inferiores a 1 parte en 10^6 .

Los potenciómetros utilizados cumplen especificaciones militares y son del tipo Bourns de 16 vueltas.

3.2.7. Multiplicador de la frecuencia del oscilador local.

En la figura 3.12 se puede ver su esquema. Los circuitos integrados CI31 y CI32 (SG1402, de Silicon General) son moduladores en anillo de banda ancha, formados por transistores. En este circuito están conectados como dobladores de frecuencia.

Aunque no es necesario el uso de circuitos sin tonizados, con este tipo de multiplicadores, se han colocado los condensadores y bobinas C310, C312, L31, L32 - con el fin de suprimir los posibles armónicos y subarmónicos resultantes de la multiplicación. El circuito inte



MULTIPLICADOR X 4					Can'	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Marcas	Denominacion									
Modificado	Fecha	Nombre	Firma							
	Dibujado		MARINA							
	Proyectado		MONTROYA							
	Comprob	1-10-70								
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					PROYECTO			FIG.	
						Nº	AF 1.11			3.12



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FISICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**

grado CI33 (LM703L, de National Semiconductor) es un amplificador diferencial de impedancias de entrada y salida altas, apropiado para funcionar en paralelo con circuitos sintonizados a la entrada y a la salida.

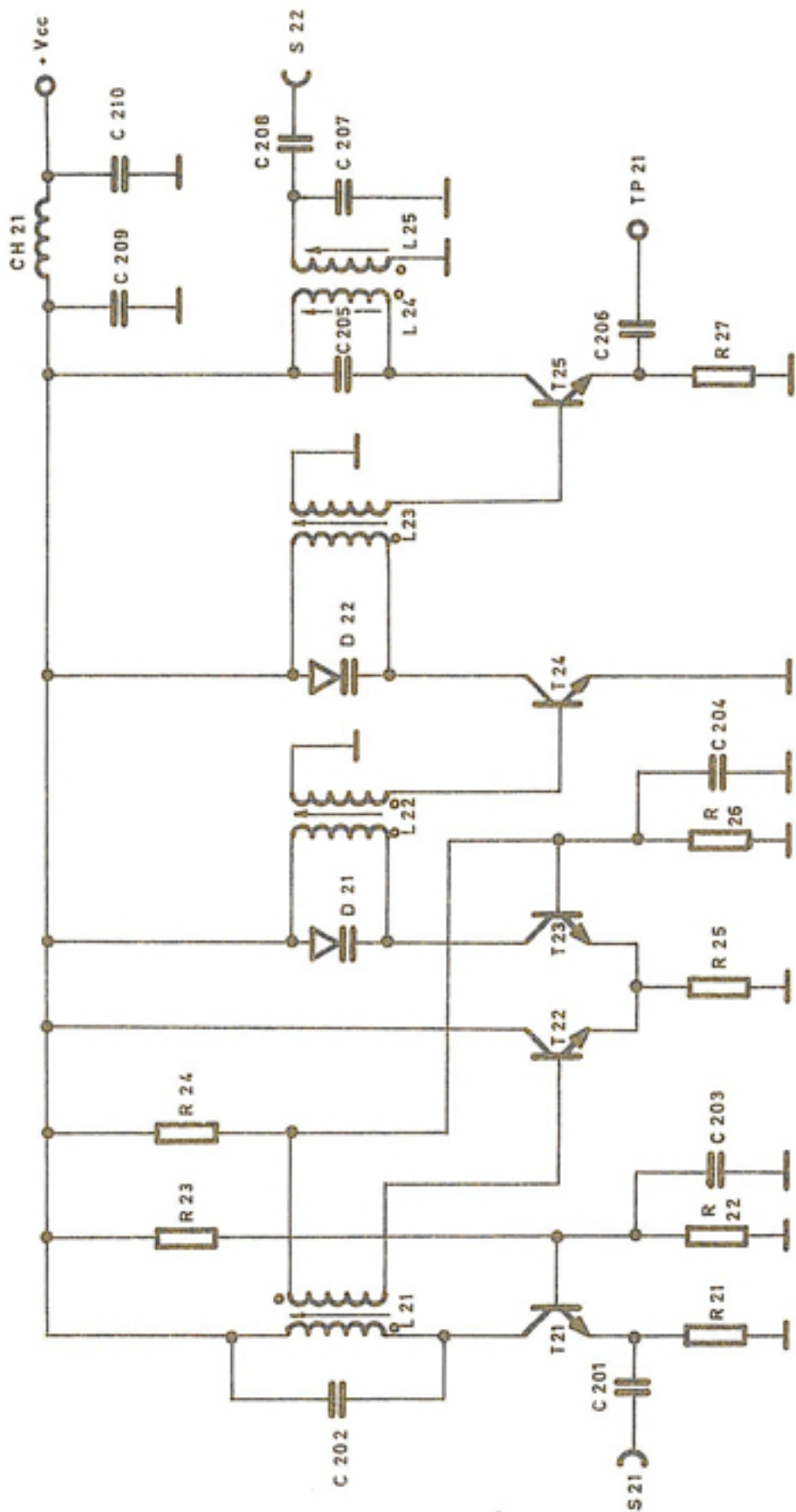
3.2.8. Divisor de la frecuencia del oscilador local.

En la figura 3.13 puede verse su circuito. La división se realiza mediante los varactores D21 y D22 - (BA112 de ITT), actuando como divisores paramétricos.

Los transistores T21, T22 y T23 (2N4692 de Piher) sirven de preamplificadores, ya que para el funcionamiento satisfactorio de los divisores, es necesario excitar los varactores con señales de varios voltios de amplitud pico-pico.

Las bobinas y condensadores L24, L25, C205, - C207, actúan como filtro supresor de armónicos, el cual es muy necesario, pues por este procedimiento de división la onda resultante tiene un elevado contenido armónico.

Los condensadores C209, C210 y el choque de RF CH21 forman un filtro P.B. que evita que los impulsos generados en la división, se transmitan a través de la alimentación a los demás circuitos.



DIVISOR DE FRECUENCIA 1/4

Marca	Denominación				Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Modificado	Fecha	Nombre	Firma							
Dibujado		MARINA								
Proyectado		MONTAYA								
Comprob	1-1-70									



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**

ESCALA	EQUIPO EMBARCADO	PROYECTO N° ΔF 1.11	FIG. 3.13
--------	------------------	------------------------	--------------

3.2.9. Receptor de 80 MHz.

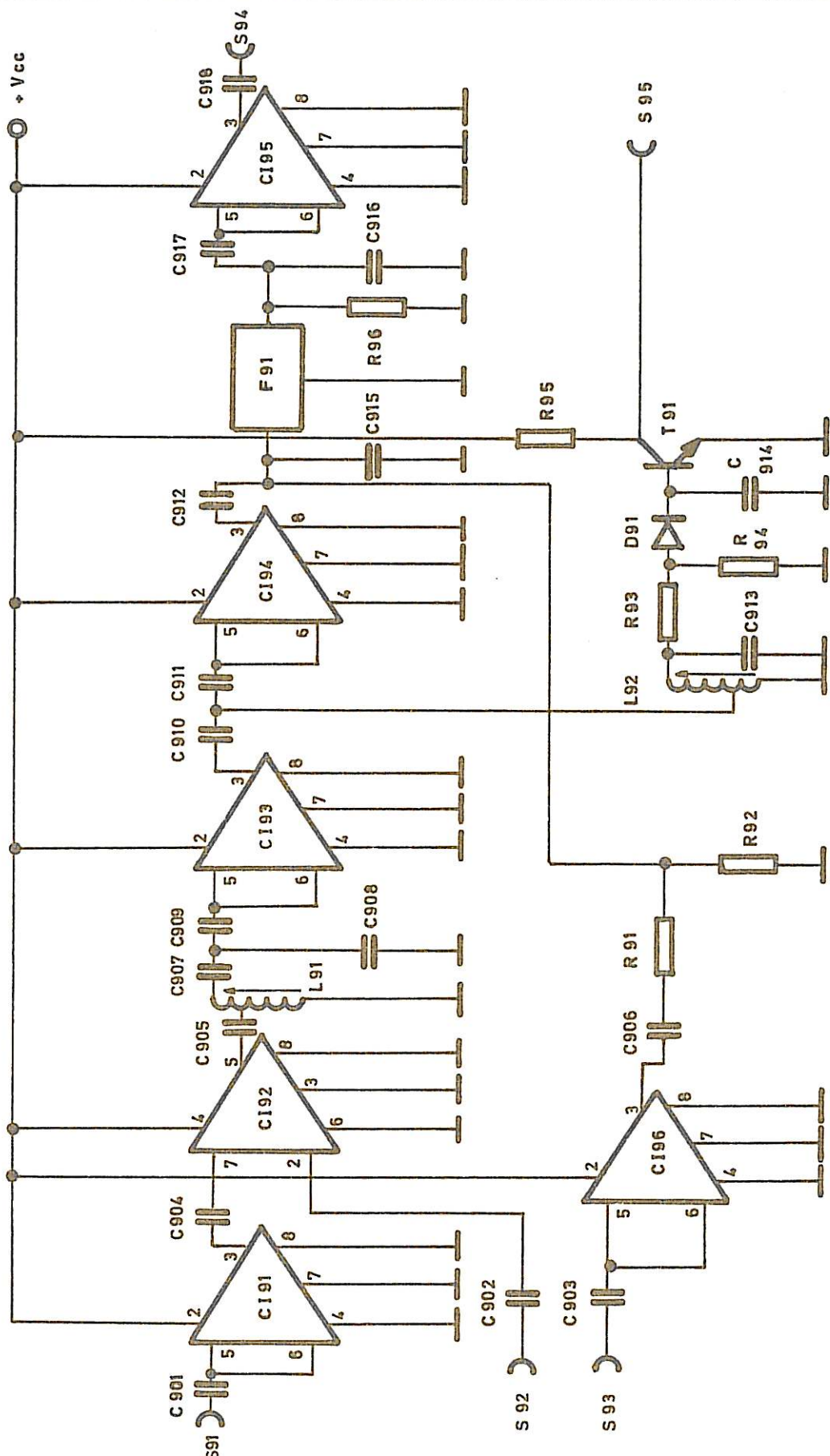
Puede verse su esquema en la figura 3.14. El circuito integrado CI91 (SL611 de Plessey) actúa como amplificador de R.F.

El mezclador está constituido por el circuito integrado CI92 (SL641 de Plessey), al que llega la frecuencia local por la entrada S92. A su salida se ha colocado un filtro constituido por C905, C907 y L91 con el fin de eliminar la RF y la frecuencia local.

Los circuitos CI93 y CI94 (SL612 de Plessey) - actúan como amplificadores de F.I. y excitadores del filtro.

El filtro de 10'7 MHz F91 (6347MB de Damon Engineering) es particularmente interesante, pues sus dimensiones son 13 mm x 13 mm x 7 mm y su peso es de 2'5 - gramos. El fabricante le da el nombre de "Filtro Híbrido" y no especifica los materiales empleados en su construcción.

El diodo D91 es un detector de nivel de señal de F.I., su salida es amplificada por T91 y enviada a - tierra a través del sistema de telemetría, con el fin de controlar el nivel de señal recibida en 80 MHz.



RECEPTOR DE 60 MHz					Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Marca	Denominación									
Modificado	Fecha	Nombre	Firma							
	Dibujado	MARINA								
	Proyectado									
	Comprob	1-6-70	MONTOYA							
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					N.º	PROYECTO AF 1.11			FIG 3.14



CENTRO DE INVESTIGACIONES FISICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO

A través de la entrada S93 llega la F.I. del receptor de 20 MHz, multiplicada ya por 4; el CI96 (SL 612 de Plessey) actúa como separador y acondicionador de señal, excitando en paralelo con CI94 al filtro F91.

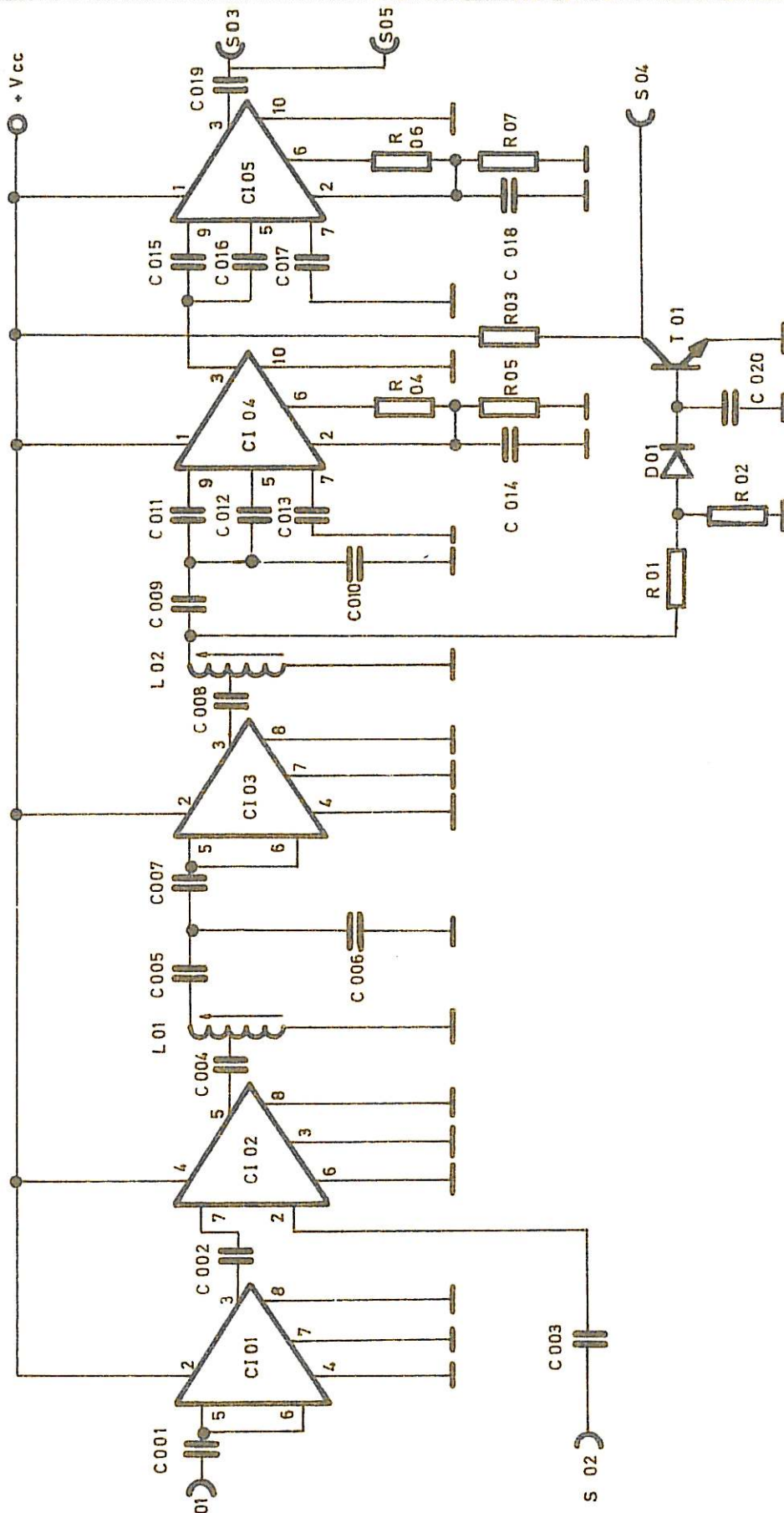
3.2.10. Receptores de 20 MHz y 5 MHz.

En las figuras 3.15 y 3.16 pueden verse sus esquemas. Como ambos coinciden, se describirá únicamente el de 5 MHz.

El circuito integrado CI71 (SL611 de Plessey) actúa como amplificador de R.F. El mezclador está constituido por el circuito integrado (SL641 de Plessey). La frecuencia local le llega por la entrada S72. A su salida se ha colocado un filtro constituido por C705, C706 y L71 con el fin de eliminar la RF y la frecuencia local antes de la multiplicación.

El diodo D71 es un detector de nivel de señal de F.I., su salida es amplificada por T71 y enviada a tierra a través del sistema de telemetría, con el fin de controlar el nivel de recepción.

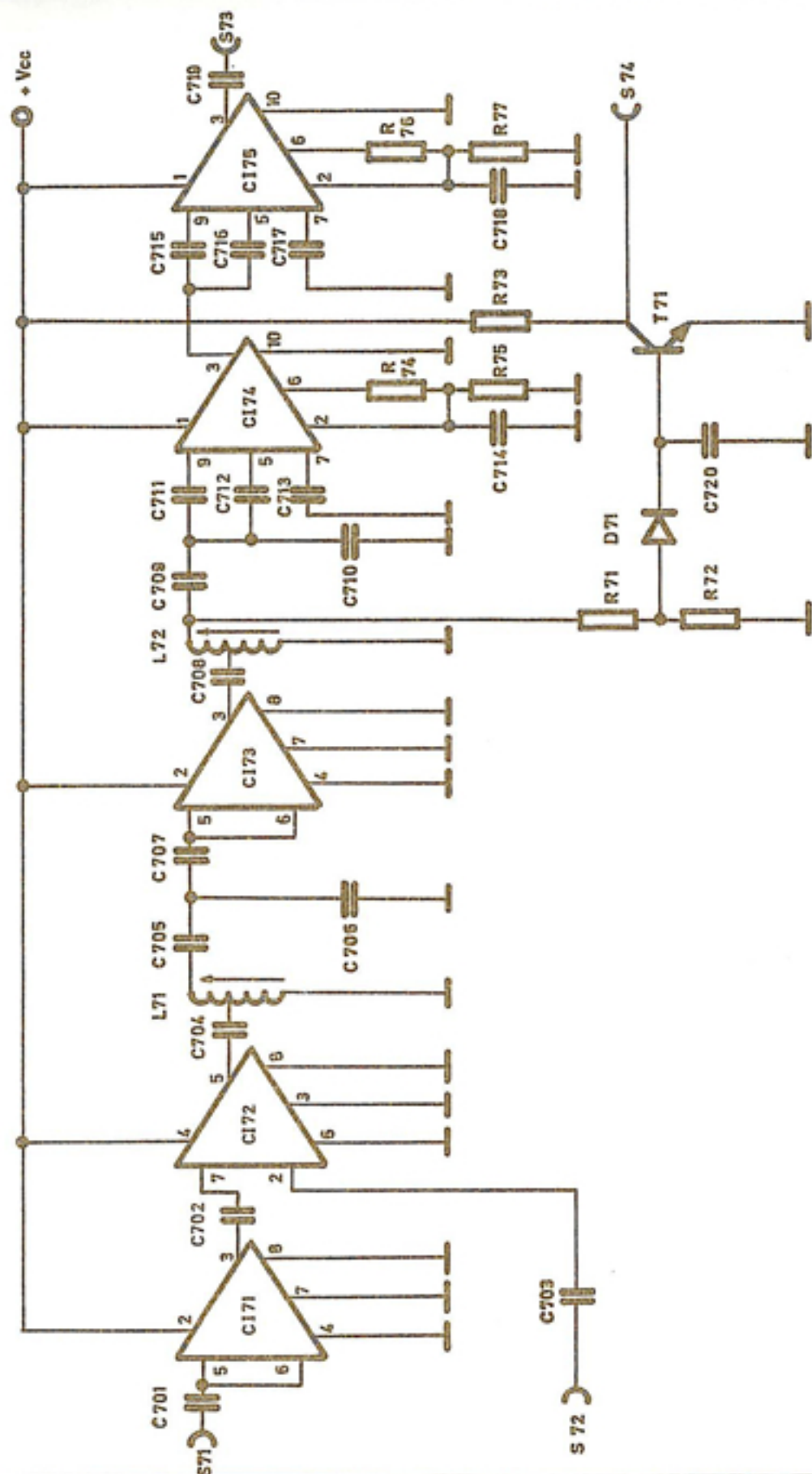
Los circuitos integrados CI74 y CI75 forman un cuadruplicador de frecuencia igual al descrito en 3.2.7.



RECEPTOR DE 20 MHz					Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Marca	Denominacion									
Modificado	Fecha	Nombre	Firma							
	Dibujado		MARINA							
	Proyectado		MONTROYA	<i>[Signature]</i>						
	Comprob	<i>Est - 20</i>								
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					Nº	PROYECTO AF 1.11		FIG. 3.15	



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**



RECEPTOR DE 5 MHz					Cant.	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Marca	Denominación									
Modificado	Fecha	Nombre	Firma							
Dibujado		MARINA								
Proyectado		MONTOYA	<i>[Signature]</i>							
Comprob.	1-6-25									
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					N.º	PROYECTO			FIG.
						AF 1.11				3 16



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**

3.2.11. Comparador de fase 20 MHz/80 MHz.

A la salida del filtro F91 de la figura 3.14, aparecen superpuestas las frecuencias intermedias del receptor de 80 MHz y del de 20 MHz multiplicada por cuatro. Como ambas señales son de nivel y frecuencia parecidos, se produce una pulsación, cuya envolvente es la diferencia de frecuencias.

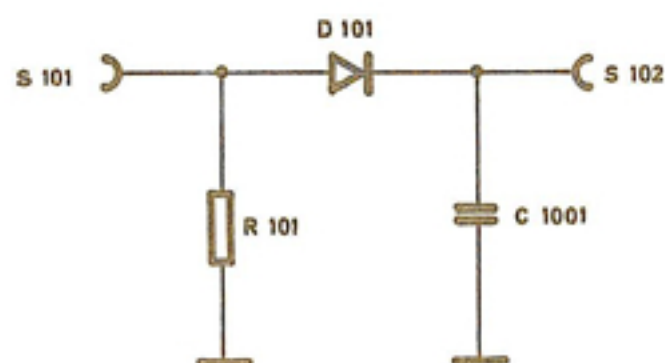
La envolvente se puede detectar, como en el caso de una modulación de amplitud, mediante un diodo y un condensador. Esto es precisamente lo que hace el circuito comparador (Fig. 3.17) .

El resultado de la comparación se envía a tierra a través del sistema de telemetría.

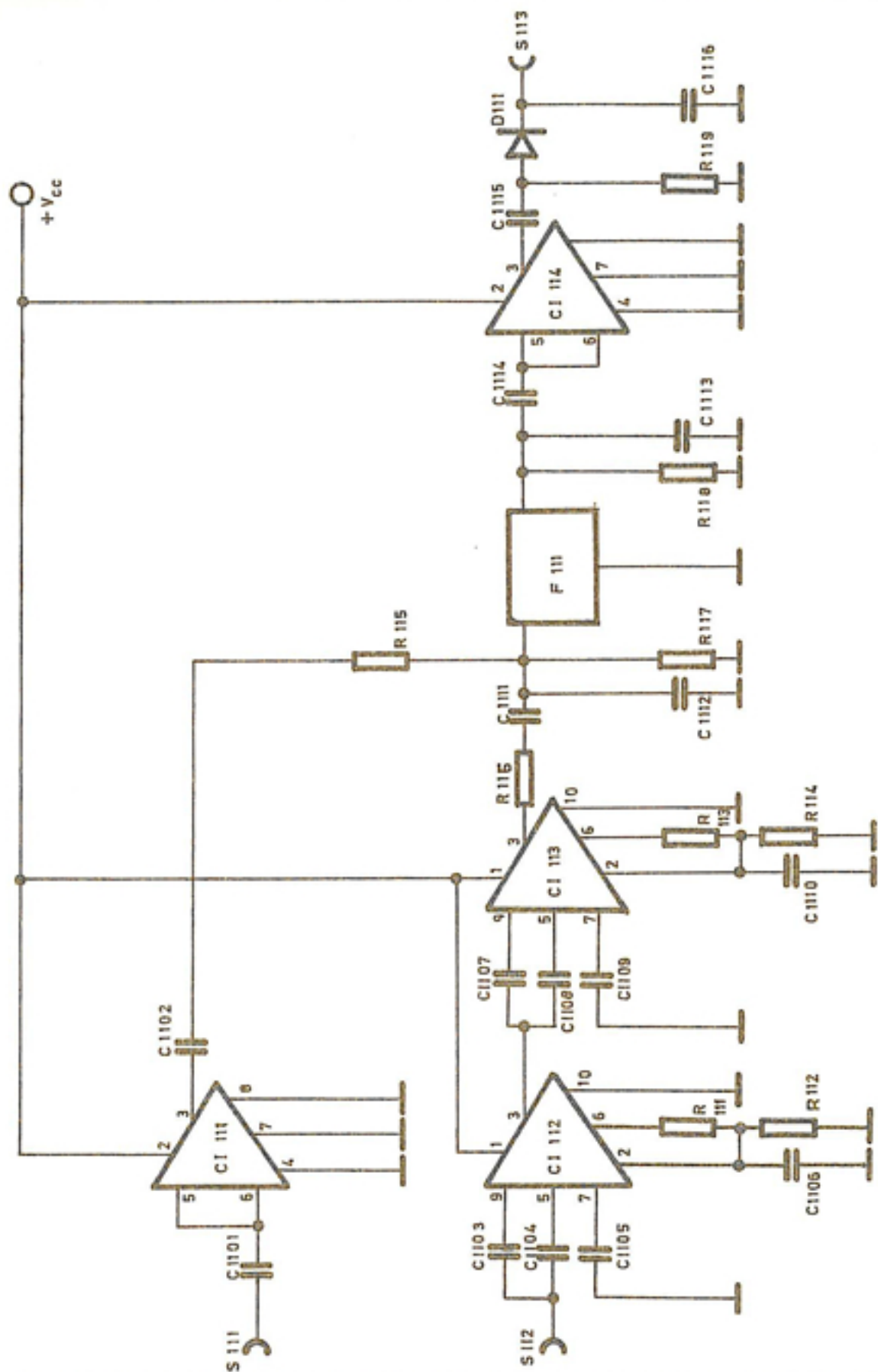
3.2.12. Comparador de fase 5 MHz/20 MHz.

Este comparador funciona igual al descrito en el apartado anterior. Su circuito aparece en la figura 3.18. En este comparador, a diferencia del anterior, se incluye un filtro de 10'7 MHz que realiza la misma función que el F91 de la figura 3.14.

El circuito integrado CI111 (SL612 de Plessey) es un separador y acondicionador de la señal de FI multiplicada por cuatro del receptor de 20 MHz.



COMPARADOR 20/80 MHz										
Marcas	Denominación				Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Modificado		Fecha	Nombre	Firma	 CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS LEONARDO TORRES QUEVEDO					
	Dibujado		MARINA							
	Proyectado		MONTOYA							
	Comprob									
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					N.º	PROYECTO AF 1.11		FIG. 3.17	



COMPARADOR 5MHz./20MHz.

Marca	Denominación				Cont.	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Modificado	Dibujado	Fecha	Nombre	Firma						
	Proyectado									
	Comprob.	2-6-70		<i>Houty</i>						



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**

ESCALA

EQUIPO EMBARCADO

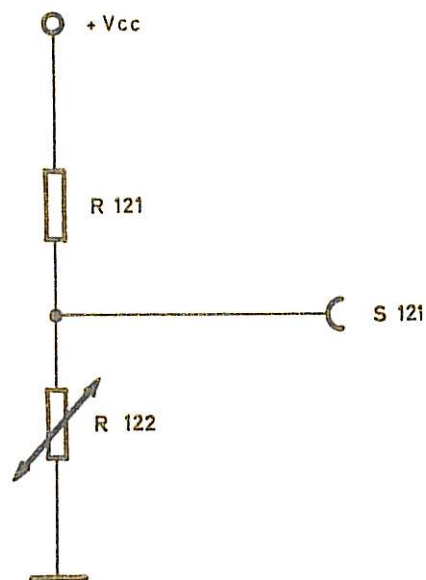
PROYECTO
N.º A.F. 1.11

FIG.
3.18

Los circuitos CI112 y CI113 sirven para cuadruplicar la frecuencia de la señal procedente del receptor de 5 MHz, de forma que a la entrada del filtro aparezca la frecuencia intermedia de éste multiplicada por 16.

3.2.13. Medidor de temperatura.

En la figura 3.19 aparece su circuito. Está - destinado a proporcionar una información de la temperatura del sistema receptor, esta información es enviada a - tierra a través del sistema de telemetría.



MEDIDOR DE TEMPERATURA										
Marca	Denominación				Cant	Material	Acabado	Dimensiones	Modelo	Peso
Modificado		Fecha	Nombre	Firma						
	Dibujado		MARINA							
	Proyectado									
	Comprob	1-6-11	MONTOYA	<i>[Signature]</i>						
ESCALA	EQUIPO EMBARCADO					PROYECTO			FIG.	
						N.º AF 1. 11			3. 19	



**CENTRO DE INVESTIGACIONES FISICAS
LEONARDO TORRES QUEVEDO**

CAPITULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. LANZAMIENTO DEL S 46 DEL ESRO.

El sistema de medida ha sido recientemente utilizado, formando parte de los experimentos realizados mediante un cohete SKYLARK, fabricado por British Aircraft Corporation (U.K.) para uso del ESRO. El lugar de lanzamiento ha sido la base ESRANGE, que el ESRO posee en Kiruna (Suecia), destinada especialmente al estudio de los fenómenos ionosféricos en el Círculo Polar Artico, donde se encuentra.

4.1.1. Datos del lanzamiento.

El lanzamiento (Fig. 4.1) se efectuó a las -- 22.00.12 del día 29 de Septiembre de 1970. El ángulo de tiro fué de 88° , alcanzando una altura de 204 km y cayendo a tierra a 68 km de distancia. El momento de apogeo - fué 246 segundos posterior al de despegue.

El motor de la primera etapa funcionó durante cuatro segundos. El motor de la segunda lo hizo durante



LANZAMIENTO DEL S 46 DEL ESRO DESDE ESRANGE

treinta segundos, produciéndose inmediatamente después de su extinción, la separación de la Carga de Pago.

La Carga de Pago se abrió, desplegando las antenas de 20/80 MHz de nuestro experimento y Sondas de Langmuir, a los 40 segundos del despegue.

Las condiciones ionosféricas en que tuvo lugar fueron de Capa de Absorción Polar.

4.1.2. Datos de la Carga de Pago.

La Carga de Pago fué construída por ESTEC. Su peso era de 140'5 kg y su longitud de 3'077 m incluido el morro cónico (Fig. 4.2). Estaba constituída por cinco módulos enchufables cilíndricos y por una sección con cubierta cónica, integrada por dos piezas (Fig. 4.3) que se eliminaron a los 40 segundos del despegue, para permitir el contacto directo de los experimentos con el plasma ionosférico.

Además de nuestro experimento, la Carga de Pago trasportaba dos Sondas de Langmuir construídas por la Universidad de Sheffield y un espectrómetro de masas -- construído por el CNES de Toulouse.

Como instrumentación complementaria figuraban un sensor lunar, un magnetómetro con tres direcciones de

CARGA DE PAGO
TERMINADA

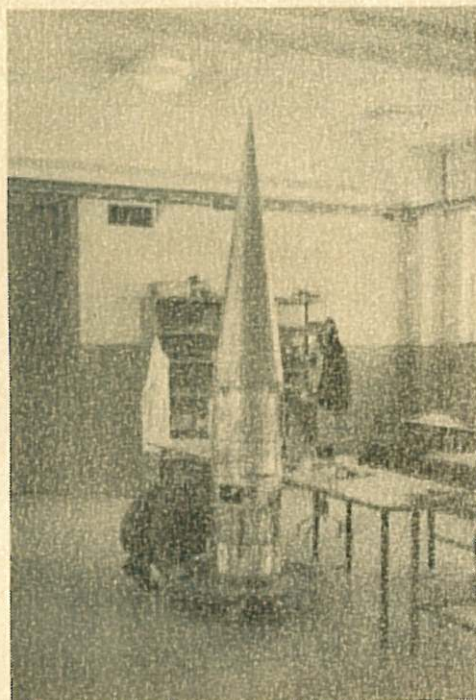


FIG. 4.2



FIG. 4.3

SISTEMA DE APERTURA DE LA
CARGA DE PAGO

medida y un trasponder para ampliar el alcance del Radar instalado en tierra.

En la figura 4.4 aparece la Carga de Pago durante las pruebas del sistema de telemetría y en la figura 4.5 se aprecia el momento de instalación de la Carga de Pago en el cohete.

4.1.3. Efecto del giro del cohete alrededor de su eje.

El cohete utilizado, originariamente no presentaba giro alrededor de su eje, pero por exigencias del Gobierno Sueco, para poder ser utilizado en Suecia, es necesario modificarlo de tal forma que presente una frecuencia de giro de 2 a 3 revoluciones por segundo.

En este lanzamiento, se pudo apreciar por los datos suministrados por el sensor lunar y el magnetómetro, que el cohete presentó un giro alrededor de su eje de unas 2'4 revoluciones por segundo durante la mayor parte de la trayectoria. Tal como hemos visto en el capítulo 2 la frecuencia de batido de ambas parejas hubiera aumentado durante toda la trayectoria en 7'2 Hz; pero al analizar las señales procedentes del sistema de telemetría, hemos observado que no existía tal efecto.

Esto quiere decir que las antenas receptoras no presentaban una polarización plana definida. Este fe-

CARGA DE PAGO DURANTE
LAS PRUEBAS DE TELEMETRIA

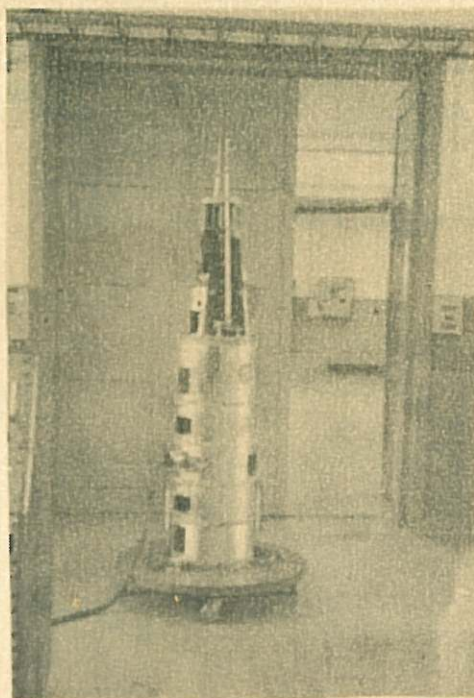
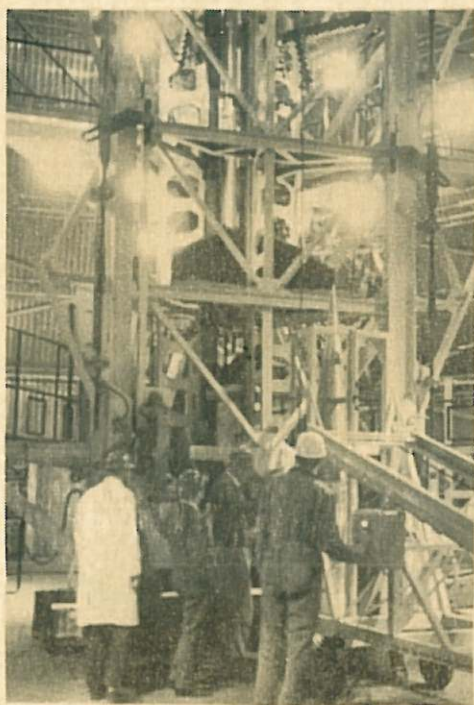


FIG. 4.4



INSTALACION DE LA CARGA DE
PAGO EN EL S 46

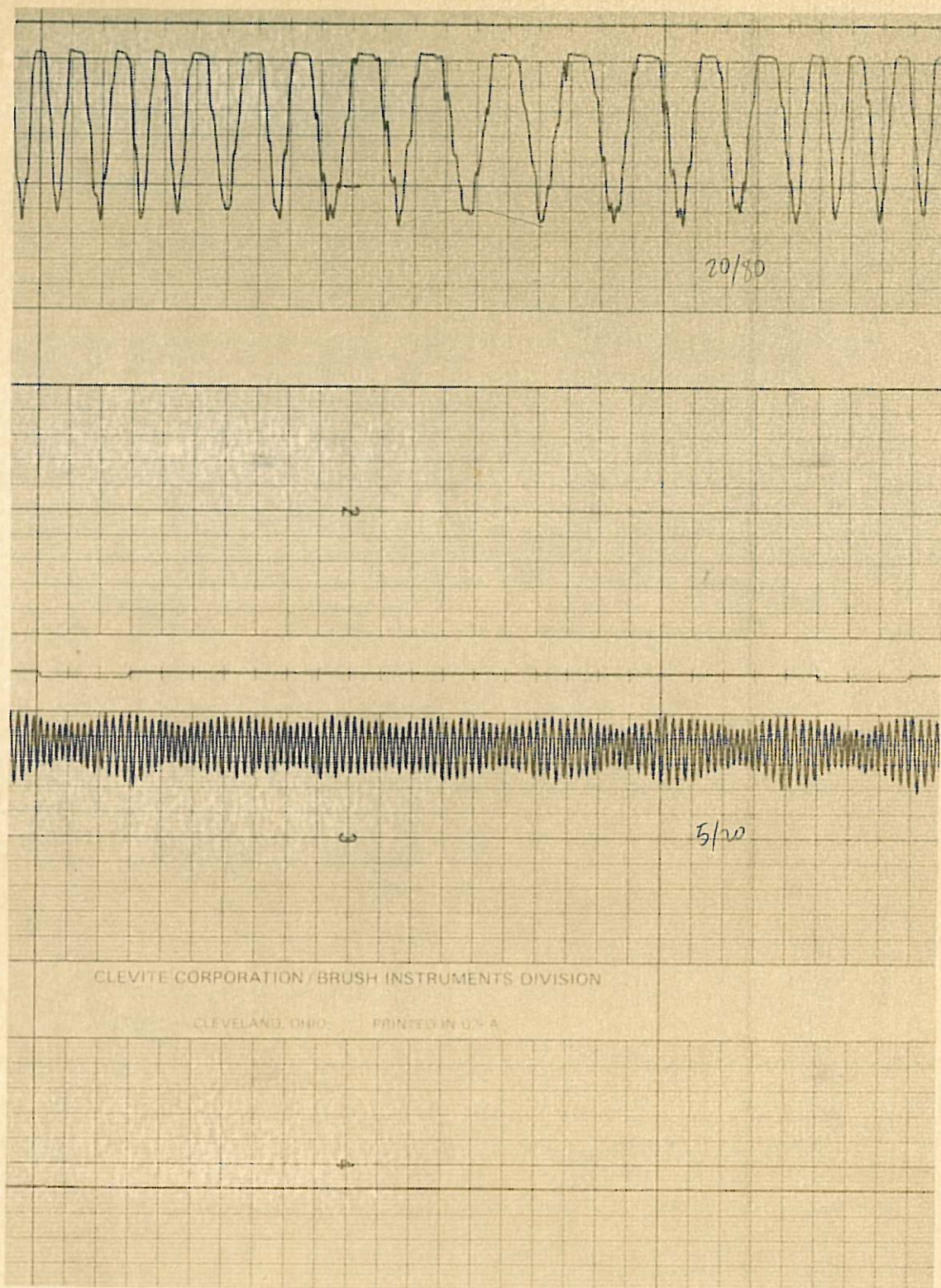
FIG. 4.5

nómeno puede atribuirse a que todo el cuerpo metálico de la Carga de Pago ha actuado como antena y por capacidad o inducción, ha excitado las verdaderas antenas receptoras, no pudiendo hablarse ya de la polarización de estas. Refuerza esta suposición el hecho de que el cuerpo de la Carga de Pago quedara interpuesto en el camino seguido por las ondas incidentes sobre las antenas receptoras. Un fenómeno similar ha sido descrito por Carl Seddon en el año 1954 (20).

Esto habrá de tenerse en cuenta para los próximos lanzamientos, ya que aunque la no aparición de la frecuencia de giro ha simplificado los cálculos, esto nos indica la poca efectividad de las antenas receptoras utilizadas. Como se indica en el capítulo 4, las antenas utilizadas en este lanzamiento han sido sustituidas por otras de tipo activo, que se creen más eficaces y que serán puestas a prueba en el lanzamiento a realizar en KOU ROU.

4.1.4. Determinación de la densidad electrónica.

Los datos recibidos a través del sistema de telemetría fueron de gran calidad y limpieza, no produciéndose ninguna interrupción y no habiendo sido necesario su posterior filtrado. En la figura 4.6 puede verse una



REGISTRO GRAFICO DE LAS SEÑALES RECIBIDAS A TRAVES DEL SISTEMA DE TELEMETRIA, CORRESPONDIENTE A 130 Km. DE ALTURA.

FIG. 4.6

muestra de ellos correspondiente a unos 130 km de altura: en la pista N° 1 aparece el batido 20/80 MHz, en la N° 2 la indicación de nivel de señal recibida en 80 MHz (saturado), en la N° 3 el batido 5/20 MHz y en la N° 4 la indicación de temperatura (35°C). La grabación ha sido -- efectuada a velocidad reducida, siendo la distancia entre las dos marcas de tiempo de 10 segundos.

Para el cálculo se ha utilizado la pareja 5/20 MHz desde el principio hasta los 140 km de altura; a partir de esta altura la onda de 5 MHz presentaba una seria interferencia a causa de la onda reflejada por una capa superior. La pareja 20/80 MHz fué útil desde los 60 km - hasta los 200 km.

Entre 200 km y el apogeo (204 km) no se pudieron hacer cálculos ya que la Carga de Pago llevaba muy poca velocidad y la frecuencia de batido era prácticamente nula.

En la figura 4.7 aparecen los resultados de la medida. La curva de trazo lleno corresponde a la medida efectuada durante el ascenso, la curva de trazo interrumpido corresponde al descenso y los puntos encerrados en círculos corresponden a los datos obtenidos por la Ionosonda existente en el campo de lanzamiento. Se debe tomar como medida válida la correspondiente al ascenso. La

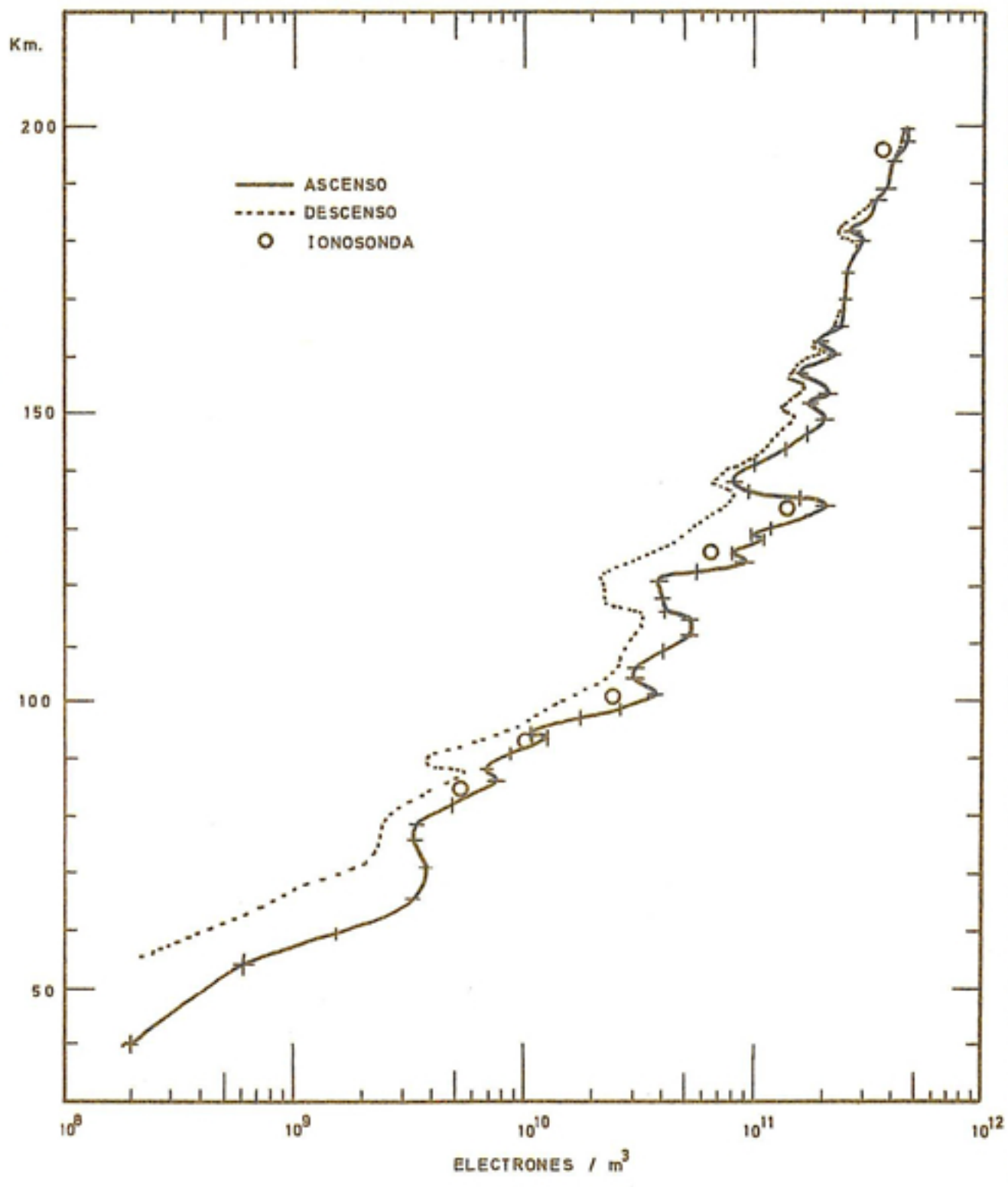


FIG. 4.7

medida de descenso sólo tiene valor de comprobación cualitativa y sus resultados no son tan seguros ya que provienen de una propagación muy oblicua. Los datos proporcionados por la Ionosonda están en buena concordancia con la medida realizada y han resultado especialmente útiles para comprobar que no tenía lugar una variación temporal apreciable del índice de refracción.

No le corresponde al autor, sino más bien a los especialistas en geofísica, dar una interpretación de los resultados obtenidos. Solamente se pondrá de manifiesto que se supone que una Capa de Absorción Polar tiene por efecto el aumento de la densidad de electrones en la capa D y la extensión de esta a muy baja altura (37), lo cual coincide perfectamente con los resultados de la medida.

Desafortunadamente, aun no han sido publicados los resultados de las medidas realizadas por la Universidad de Sheffield con sus Sondas de Langmuir, no pudiendo contrastarlos con los nuestros.

4.1.5. Determinación de la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas.

Por comparación de los índices de refracción obtenidos para 5 MHz y 20 MHz entre 60 km y 80 km se ha

determinado la frecuencia de colisión efectiva de los electrones con las demás partículas.

Extrapolando linealmente la curva obtenida se ha conseguido un valor estimativo (Fig. 4.8) para la zona comprendida entre 60 y 40 km, y con éste se ha calculado la densidad electrónica a estas alturas. Los valores obtenidos no discrepan grandemente de los valores definidos como típicos en una atmósfera patrón (38) los cuales se representan en la figura por círculos aislados.

Se ve claramente que en un caso como el presente, en el que la Ionosfera comienza a los 40 km, no es lícito despreciar el efecto de la frecuencia de colisión a estas alturas, lo que conduciría al cálculo de densidades inferiores, en un 33%, a las existentes realmente.

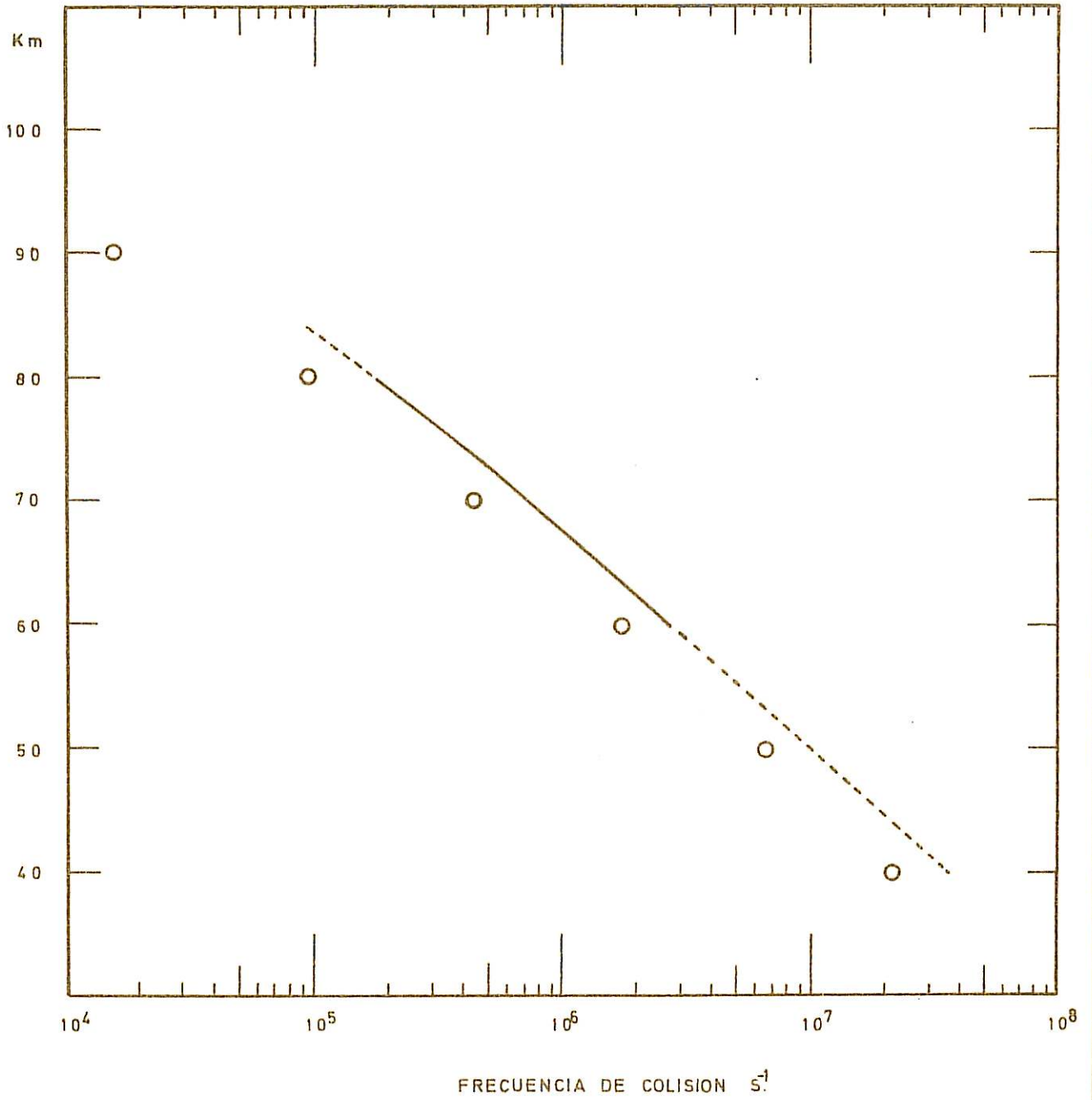


FIG. 4.8

CONCLUSIONES

Se describe en el presente trabajo un SISTEMA DE MEDIDA DE LA DENSIDAD ELECTRONICA LOCAL EN LA IONOSFERA, basado en la comparación de la velocidad de fase de tres ondas electromagnéticas de frecuencias armónicas - que se propagan en el modo iónico entre el suelo y un cohete-sonda que se aleja verticalmente de éste. Del planteamiento teórico y de los resultados experimentales se han obtenido las siguientes conclusiones:

- 1º - Analizados los sistemas de medida de uso más frecuente, se llega a la conclusión - de que el más exacto es el basado en la - "Comparación de fase de 2 ondas relacionadas armónicamente, que se propagan entre un vehículo espacial y el suelo". Este, - presenta ciertas limitaciones de orden - práctico y teórico que dificultan su aplicación.

2º - Se desarrolla un sistema de medida propio, que mantiene la idea central de la comparación de la velocidad de fase de ondas - electromagnéticas de frecuencias armónicas, incluyendo un planteamiento teórico diferente y utilizando soluciones experimentales completamente nuevas que evitan las limitaciones del anterior.

Sus características diferenciales son:

- a) Se realiza la comparación de TRES ondas de frecuencias armónicas, en lugar de dos.
- b) Se utilizan ondas polarizadas en un MO DO UNICO: EL IONICO.
- c) Se sitúan los TRANSMISORES EN TIERRA, radiando potencias muy elevadas.
- d) Se utilizan tecnologías avanzadas en - filtros y circuitos integrados, en el diseño del subsistema receptor.

En el análisis físico-matemático del sistema - propio, se demuestra que:

3º - Para una determinación rigurosa de la densidad electrónica es necesario medir el -

índice de refracción de la Ionosfera a dos frecuencias distintas, lo cual sólo es posible a partir de la comparación de las velocidades de fase de TRES ondas de frecuencias armónicas, en lugar de dos.

4º - El modo de propagación más favorable para la realización de la medida, es el IONICO por sufrir menor atenuación en la Ionosfera que el electrónico.

5º - Durante la fase ascendente de la trayectoria del cohete, las condiciones de propagación coinciden con las ideales en que está basado el cálculo teórico, lo que garantiza los resultados experimentales. En la fase descendente, se produce una curvatura de los caminos de propagación, con efectos difícilmente previsibles teóricamente, lo que introduce errores en los resultados experimentales, que se emplearán solamente a efectos cualitativos.

6º - Cuando el ángulo formado por el vector campo magnético terrestre y la dirección de propagación de la onda es inferior a 38° se puede utilizar en el cálculo del -

índice de refracción la Aproximación Casi Longitudinal de las ecuaciones de dispersión y polarización; siendo aplicable esta aproximación a la base ESRANGE en lanzamientos verticales, ya que la inclinación magnética en esta es 75° .

7º - El giro del cohete alrededor de su eje, - produce una alteración en la comparación de velocidades de fase, que debe ser tenida en cuenta y compensada para poder llegar a un valor auténtico del índice de refracción de la Ionosfera.

8º - Es necesario cerciorarse (mediante el uso de una ionosonda) de que no se producen - durante la realización de las medidas, variaciones temporales del índice de refracción de la Ionosfera, que conducirían a - valores de densidad electrónica erróneos.

Utilizando el sistema de medida propio en la - base ESRANGE (Kiruna) ($67^{\circ}15'$ Lat Norte), durante una alteración ionosférica del tipo Capa de Absorción Polar, - se llegó a las siguientes conclusiones:

- 9^o - El uso de tres ondas de frecuencias armónicas, comparadas dos a dos, hace posible la medida de densidades electrónicas muy pequeñas así como de densidades electrónicas elevadas. Habiendo llegado a medir densidades comprendidas entre 10^8 elec/m³ y 5×10^{11} elec/m³, pudiéndose aún llegar a medir densidades del orden de $4 \cdot 10^{12}$ elec/m³.
- 10^a - El hecho de que durante esta alteración ionosférica la capa D se extendiese hasta los 40 km de altura, pone de manifiesto la importancia de la determinación correcta de la frecuencia de colisión de los electrones con las partículas restantes, para la exactitud de la medida de densidad electrónica, ya que a estas alturas la frecuencia de colisión es muy elevada, e ignorarla conduciría a un error del orden del 30%, en el cálculo de la densidad electrónica.
- 11^o - Ha quedado demostrado lo acertado de la decisión de radiar potencias elevadas (lo que obliga a situar los transmisores en el suelo) , ya que durante todo el tiempo -

que ha durado la realización de la medida no se ha producido ninguna anulación del nivel de señal en los receptores, ni ha sido nunca sobrepasado por el nivel de ruido o de interferencias, dando por resultado unos registros de señal claros, que no ha sido necesario filtrar.

- 12º - Un asunto de interés que queda planteado, es el estudio de antenas receptoras para la Carga de Pago verdaderamente eficaces. Se ha comprobado que las antenas utilizadas en esta ocasión no han recibido la onda directamente del espacio, sino por inducción o capacidad del cuerpo metálico de la Carga de Pago, que ha actuado como verdadera antena. Por ello, se piensa sustituir en las próximas experiencias estas antenas por otras ya desarrolladas, que comportan elementos activos y cuya forma permite situarlas en la posición que parezca más adecuada.

APENDICE BIBLIOGRAFICO

- 1.- E.V. Appleton; Proc. URSI. Washington (1927)
- 2.- D.R. Hartree; The propagation of electromagnetic waves in a refracting medium in a magnetic field. Proc Cambridge Phil. Soc. 27, p. 143 (1931)
- 3.- Goubau; Dispersion in einem Elektronen-Ionen-Gemisch dass unter dem Einfluss eines ausseren Magnetfeldes staht. Hochfrequenz und Electroakust. 46, p. 37 -- (1935)
- 4.- J.A. Ratcliffe; The Magneto-ionic Theory and its -- application to the Ionosphere. Cambridge Univ. Press London (1959)
- 5.- S.A. Bowhill y E.R. Schmerling; Advances in Electronics and Electron Physics. 15, p. 278 (1961)
- 6.- K. Davies; National Bureau of Standards, Monograph N° 80, 3.3.2 (1965)
- 7.- W.E. Gordon; Incoherent Scattering of Radio Waves by free electrons with applications to Space exploration by Radar. Proc. IRE 46, p. 1824 (1958)

- 8.- R.A. Helliwell y M.G. Magan; Atmospheric Whistlers.
Proc. IRE 47, p. 200 (1959)
- 9.- I. Langmuir y H. M. Mott-Smith; Studies of electric discharges in gases at low pressures. General Electric Rev. 27, p. 449, 538, 616, 762, 810 (1926)
- 10.- V.I. Krassovsky; Exploration of the Upper Atmosphere with the help of the Third Soviet Sputnik. Proc. IRE 47, p. 289 (1959)
- 11.- J.E. Jackson y J. A. Kane; J. Geophys. Res. 64, p. 1074 (1959)
- 12.- J.H. Wager; The University of Birmingham electron density and temperature experiments on the Ariel III Satellite. The Radio Electronic Engineer. 35, p. 55 (1968)
- 13.- E.C. Mackenzie y J. Sayers; A radio frequency electron density probe for rocket investigation of the Ionosphere. Planet. Space. Sci. 14, p. 731 (1966)
- 14.- C.D. Florida; The development of a series of Ionospheric Satellites. Proc. IEEE. 57, p. 867 (1969)
- 15.- W.W. Berning; J. Meteorol. 8, p. 175 (1951)
- 16.- W. Garru, R. Gendin y M. Reysatt; Proc. 1er Intern. Space Sci. Symposium. p. 502. Niza (1960)

- 17.- J.C. Seddon; Propagation measurements in the Ionosphere with the aid of Rockets. J. Geophys. Res. 58, p. 323 (1953)
- 18.- J.E. Jackson; Measurements in the E-layer with the Navy Viking Rocket. J. Geophys. Res. 59, p. 377 - (1954)
- 19.- J.C. Seddon; Electron densities in the Ionosphere. J. Geophys. Res. 59, p. 463 (1954)
- 20.- J.C. Seddon; Rocket Investigations of the Ionosphere by a Radio Propagation Method. Upper Atmosphere Research Report N^o 22, Naval Research Laboratory, - Washington D.C. (1954)
- 21.- J.C. Seddon, A.D. Pickar y J.E. Jackson; Continuous electron density measurement up to 200 km. J. Geophys. Res. 59, p. 513 (1954)
- 22.- J.E. Jackson, J.A. Kane y J.C. Seddon; Ionosphere - electron-density measurements with the Navy Aerobee-HI Rocket. J. Geophys. Res. 61, p. 749 (1956)
- 23.- J.E. Jackson y J.C. Seddon; Ionosphere electron-density measurements with the Navy Aerobee-HI Rocket. J. Geophys. Res. 63, p. 197 (1958)
- 24.- J.C. Seddon y J.E. Jackson; "Rocket arctic Ionosphere measurements. Nat. Acad. of Sci. IGY Rocket Report

Nº 1 (1958)

- 25.- J.A. Kane; Artic measurements of electron collision frequencies in the D region of the Ionosphere. J. - Geophys. Res. 64, p. 133 (1959)
- 26.- J.E. Jackson y S.J. Bauer; Rocket measurements of a daytime electron density distribution in the topside Ionosphere. J. Geophys. Res. 67, p. 1675 (1962)
- 27.- J.E. Jackson y S. J. Bauer; Rocket measurements of a daytime electron density profile up to 620 km. J. Geophys. Res. 66, p. 3055 (1961)
- 28.- S.J. Bauer y J.E. Jackson; A small multi-purpose - rocket payload for ionospheric studies. Presentado al IV International Space Science Symposium (COSPAR) Warsovia (1963)
- 29.- W.W. Berning; A sounding rocket measurement of electron densities to 1500 km. J. Geophys. Res. 65, p. 2589 (1960)
- 30.- J.E. Jackson y G.H. Spaid; Ground stations for NRL rockets studies of the Ionosphere. Upper atmosphere research report Nº XXXV, Naval Research Laboratory, Washington D.C. (1959)
- 31.- J.E. Jackson y J.A. Kane; Breakdown and detoning - of transmitting antennas in the Ionosphere. NRL Re-

- port 5345. Washington D.C. (1959)
- 32.- IRE; Standards on Wave Propagation. Proc. IRE 38,
p. 1264 (1950)
- 33.- D. Quemada; Ondes dans les plasmas. Hermann, p. 84
(1968)
- 34.- K. Rawer y K. Suchy; Handbuch der Physik Band
XLIX/2. Springer Verlag, p. 49 (1964)
- 35.- ITT; Reference data for Radio Engineers, 4^e Ed. p.
763 (1957)
- 36.- K. Bullington; Radio Propagation Fundamentals Bell
Telephone Lab. Inc. (1962)
- 37.- H. Rishbeth y O.K. Garriot; Introduction to Ionos-
pheric Physics. Academic Press. p. 262 (1969)
- 38.- K. Davies; obra citada. Tabla 1.3