

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Ciencias de la Tierra

CENTRO DE GEOCIENCIAS

**PRIMERAS OBSERVACIONES A 139.0 MHz. REALIZADAS EN EL
MEXART**

**TESIS QUE
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

CÉSAR RODRÍGUEZ JIMÉNEZ

DIRECTOR:

DR. HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRIQUEZ

DICIEMBRE 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGREDECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente a la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), por la oportunidad de permitirme un espacio a mis ideas, trabajo y superación personal.

Agradezco a mi esposa Monica, por su infinita paciencia durante mi estancia en la maestría, aternamente agradecido mony.

Agradezco a mis familiares y amigos que me apoyaron en todo durante mis rachas buenas y malas por el camino de la vida.

Especial agradecimiento a mi asesor el Dr. H. Román Pérez Enríquez, por su infinita paciencia y conocimientos sobre el tema de fisica espacial.

A mis compañeros del MEXART, mas que compañeros de trabajo somos amigos de trabajo en especial al M.C. Armando Carrillo V. Por su ayuda y regaños durante mi estancia en el MEXART.

PRIMERAS CALIBRACIONES REALIZADAS A 139 MHz. EN EL MEXART

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Actividad Solar	4
1.2 El viento Solar y Clima Espacial	8
1.3 Relación Sol - tierra.	10
2. RADIOTELESCOPIOS Y CIP	14
2.1 Radiotelescopios	14
2.1.1 Definición y Funciones de un Radiotelescopio	15
2.1.2 Radiotelescopios en el Mundo	18
2.2 La técnica de Centelleo Interplanetario	20
3. EL MEXART (arreglo de antenas mexicano)	25
3.1 Infraestructura Física del MEXART	25
3.2 Descripción del Arreglo de la Antena en el MEXART	28
3.3 Parámetros de Observación del MEXART	35
3.4 Descripción de la respuesta electromagnética del arreglo de dipolos a la recepción de radiación de objetos celestes.	43
4. PRIMERAS CALIBRACIONES DEL MEXART CON FUENTES ESTELARES	51
4.1 Adquisición de las Primeras Calibraciones del MEXART	51
4.2 Procesamiento de las Primeras Calibraciones en el MEXART	54
4.3 Resultados de las Primeras calibraciones en el MEXART	57
CONCLUSIONES	84

PREÁMBULO

En astronomía las ondas de radio se utilizan para estudiar objetos que se encuentran en el interior de nubes de gas y polvo, al tener una longitud de onda mayor, no son afectadas por el gas o el polvo permitiendo el estudio en regiones oscuras y densas. Pero para el estudio desde la tierra de estas ondas de radio con instrumentos electrónicos, deben considerarse aspectos que modifican la información de las ondas, como la propagación y perturbación en la atmósfera terrestre y fuera de ella (clima espacial) de fenómenos físicos que son originados por el sol (eyecciones de masa coronal, fulguraciones entre otros), que en su conjunto se conocen como la actividad magnética del sol, propagándose a través del viento solar por toda la heliosfera.

Un instrumento que es utilizado para el estudio de ondas de radio provenientes del exterior de la tierra se llama radiotelescopio que es un transductor que convierte la información de las ondas electromagnéticas en un voltaje y al final en una potencia (db), que es lo que se estudia, analiza y que tiene como finalidad recoger toda la radiación del objeto que se desea estudiar en la frecuencia que está sintonizado.

En el municipio de Coeneo, Michoacán localizado a 350 Km. del noroeste de la ciudad de México, se encuentra el Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario, que trabaja a una frecuencia sintonizada de 139.0 MHz. Y que estudiará el estado que guarda el clima espacial basado en la observación de centelleo de fuentes estelares. En la etapa de construcción del radiotelescopio se están calibrando las primeras líneas de transmisión/recepción de señal, este trabajo trata sobre los primeros resultados de dichas calibraciones en las líneas 7, 9 y 11 de 64 que componen el radiotelescopio, tomando de referencia los transitos de fuentes estelares como: CYGNUS A, CASSIOPEA, NEBULOSA DEL CANGREJO, VIRGO A y nuestra estrella EL SOL.

Es decir, que en esta tesis nos concentraremos, sin invocar el centelleo, en estas mediciones de calibración y haremos el análisis de las señales de las fuentes arriba mencionadas que se pueden observar con una sola línea en un caso y sumando dos líneas en otros casos, comparando su gráfico (amplitud vs tiempo) de cada día de observación de la fuente con su ajuste al promedio. Lo que se busca es si con base en los transitos de las fuentes, la superficie eléctrica y componentes electrónicos de cada línea de transmisión de la antena, está bien calibrada en la parte de recepción de señal y tomar como referencia dichos resultados como antecedentes documentados para la homogeneización de las

restantes líneas, mencionamos también las características físicas y técnicas de operación del instrumento.

Para el análisis de las series de datos, obtenidas con el software LABVIEW y procesadas con ORIGIN, en el Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Mich. (MEXART), se consideró un periodo de observación de 20 días en el mes de enero de 2005, entre los resultados se visualizo cómo en la suma de señal de las antenas 7 y 9 no aportan significativamente mayor sensibilidad al radiotelescopio debido, a que en el receptor no se está realizando la suma de las antenas conectadas. Otro resultado significativo, es la saturación del receptor cuando se superponen en el mismo intervalo de transito dos fuentes de flujo intenso como son el sol y Cygnus A. En los días e intervalos de transito de la fuente la señal de Virgo A de flujo 1100 Jy, no se notó claramente transito por el nivel de ruido de la antena confundiendo con interferencias.

La tesis comprende cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta una breve introducción sobre el clima espacial y los eventos solares considerados dentro del ciclo solar, así también la relación electromagnética sol-tierra y los efectos de dicha relación en sistemas eléctricos y electrónicos que operan en la tierra. El capítulo dos se refiere los radiotelescopios. En él se presentan su ubicación, propósitos y algunas características físicas de operación de instrumentos relacionados con el MEXART, así también la descripción de la técnica de centelleo interplanetario que aplicará el radiotelescopio cuando este operando al cien por ciento.

El capítulo tres describe la infraestructura física y técnica con la que cuenta el MEXART, al momento de escribir este trabajo. También se describe el tipo de antena que se utiliza, dipolos de onda completa, y su patrón de radiación de una sola antena y patrón de radiación en un bloque compuesto por 16 antenas. Se menciona el recorrido de la señal por los diferentes sistemas y subsistemas electrónicos descritos por diagramas de bloques, hasta su procesamiento y graficación así como los parámetros de observación que tiene el radiotelescopio. Se hace una descripción breve y técnica de los componentes más importantes en la adquisición de señal como son amplificadores de potencia, el balun y receptor con diagramas de flujo eléctrico.

En el capítulo cuatro se presentan los procedimientos en software y componentes físicos para adquirir las series en tiempo real de las observaciones de fuentes estelares, a una frecuencia central de operación de 139.0 MHz. Se presentan los resultados de las series de tiempo en los transitos de las fuentes estelares graficadas en el siguiente orden: (1) En un sólo gráfico se reúnen todos los transitos de la fuente recogidos durante el mes en tiempo real en tres dimensiones, (2) Se reúnen todos los transitos en un intervalo de tiempo de 30

minutos, (3) Se presenta el ajuste al promedio del tránsito de la fuente en cuestión considerando todas las series de tiempo adquiridas en el mes, (4) Se presentan los gráficos divididos en cuatro paneles de la fuente en cuestión por día, donde cada panel representa el tránsito de la fuente y superponiendo el ajuste al promedio en el tránsito. Al final del capítulo se hace una breve discusión sobre los transitos de las fuentes considerando los gráficos y sus amplitudes de ellas.

El capítulo 5, presenta las conclusiones de este trabajo así como algunas sugerencias para el mejoramiento en su conjunto de los trabajos de calibración de las restantes antenas y sus sistemas electrónicos que cada una tiene, con el fin de mejorar las observaciones de éstas y otras fuentes estelares que se realicen.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El hombre siempre ha estado interesado y ha elaborado teorías sobre el comportamiento de los objetos celestes y medio interplanetario (MI). Que intervienen directa e indirectamente en nuestra relación con el entorno llamado clima espacial, que es el estado del ambiente magnético que rodea a la Tierra.

La descripción de los fenómenos y manifestaciones que ocurren en el sol es un tema de estudio muy importante ya que, por un lado, podemos comprender en cierta medida el papel que juega el sol en nuestro planeta desde inicio hasta nuestros días, y por el otro, porque la actividad solar es fuente de las perturbaciones que se mueven a través del medio interplanetario, de ahí la importancia de contar con instrumentos de monitoreo en la tierra que “vigilen” el estado que guarda el clima espacial. En este capítulo introductorio presentamos brevemente, una descripción de estos fenómenos y manifestaciones de actividad solar y su relación en algunos efectos de éstos en sistemas eléctricos y fenómenos físicos que acontecen en la tierra.

1.1 ACTIVIDAD SOLAR

Desde su creación (4500 millones de años aprox.), y situado a una distancia de 149 millones de kilometros (1 UA) de nuestro planeta, el sol ha sido nuestra única fuente de energía. De ahí inicia la importancia de conocer los fenómenos que ocurren en nuestra estrella y que repercuten de manera directa o indirecta a nuestro entorno terrestre en diversas manifestaciones como el campo magnético, el cambio climático global y en nuestra vida misma en la tierra.

El Sol es una esfera de gas caliente, pero no una esfera homogénea; tiene una estructura diferenciada en capas concéntricas de diferentes propiedades. El interior del sol está estructurado en tres regiones llamadas, desde adentro hacia fuera, *núcleo*, *zona radiativa* y *zona convectiva*. El núcleo abarca desde el centro del sol hasta una distancia de 0.25 radios solares (1 radio solar, $R_s = 696\,000\text{ Km}$); la zona radiativa va de 0.25 R_s hasta una distancia de 0.78 R_s ; y la zona convectiva abarca de 0.78 R_s hasta la superficie (figura 1.1).

El sol tiene muy diversas formas de actividad que de una u otra manera están relacionadas con un ciclo de actividad solar de aproximadamente 11 años. Una manifestación de

actividad solar son las llamadas manchas solares que tienen lugar en la región fotosférica, es decir, la superficie solar, y que son distinguibles desde nuestro planeta, con ayuda de un instrumento astronómico.

Las manchas son zonas de la fotosfera con temperatura menor que el resto de ella que se encuentra a ~5700 K (1,000 K menos) (**Parker, 1955**).

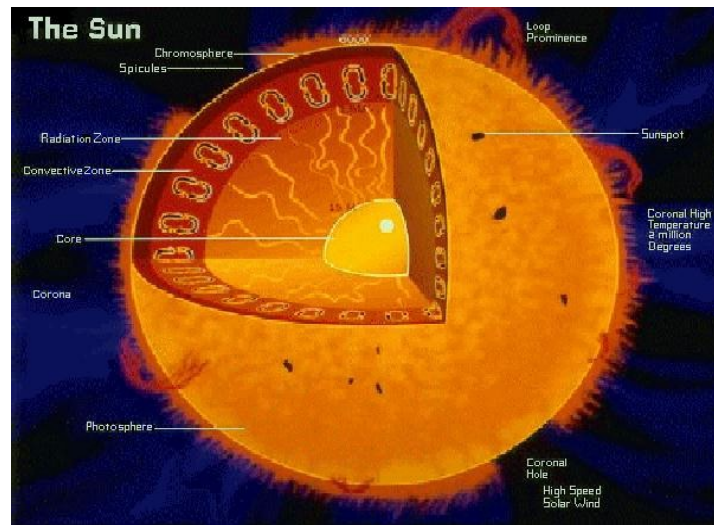
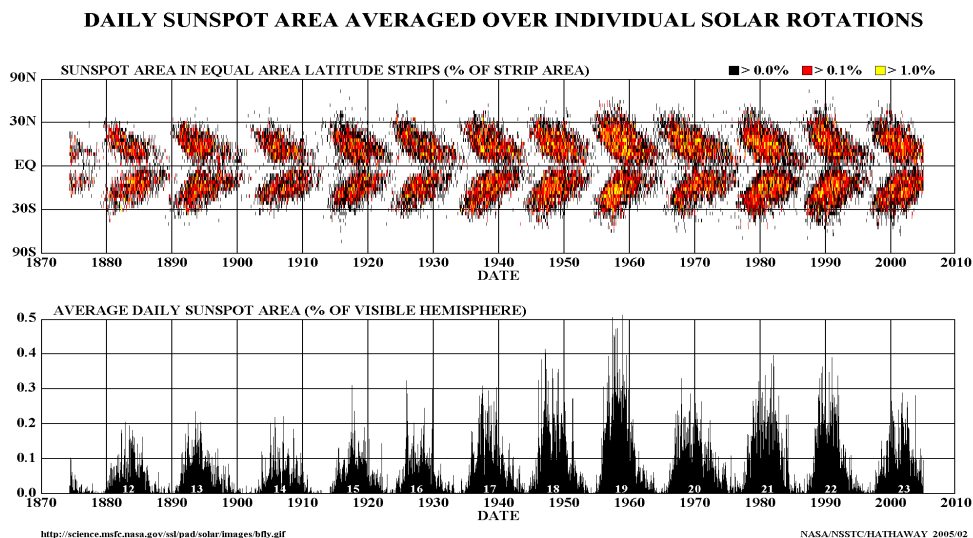


Figura 1.1 Estructura general de las zonas y regiones que componen el sol. Tomada de <http://spaceweather.com>

Las observaciones detalladas de manchas solares han sido obtenidas por el observatorio real de Greenwich, Inglaterra desde 1874. Estas observaciones incluyen la información sobre los tamaños y las posiciones de manchas solares así como su número. Estos datos muestran que las manchas solares no aparecen al azar sobre la superficie del sol pero se concentran en dos vendas de latitud en cualquier lado del ecuador. Un diagrama de mariposa (figura 1.2) muestra las posiciones de los puntos para cada rotación del sol desde



1874. Se observa que la primera forma de estas bandas en las latitudes medias, se ensancha y después se mueve hacia el ecuador mientras que progresa cada ciclo solar.

Figura 1.2. Diagrama de mariposa y su correlación con el porcentaje de número de manchas solares, se puede observar la evolución de los ciclos solares tomando como referencia a las manchas. (Tomada de consorcio NOAA).

Los grupos de manchas, junto con las protuberancias, fulguraciones, eyecciones de masa coronal, etc. constituyen las llamadas *regiones activas* (figura 1.3) que forman parte de la actividad solar. Estas regiones activas evolucionan con el ciclo solar, describiremos brevemente algunos de estos fenómenos que las componen.

Las *protuberancias* son visibles durante la totalidad de un eclipse solar como arcos de color rojo en el borde del disco solar. El color rojo es el mismo que el color que tiene la cromosfera y procede de la emisión en las líneas del hidrógeno. Parece ser que las protuberancias son controladas por los campos magnéticos. La mayoría tienen forma de arco, cuya apariencia nos recuerda la distribución de limaduras de hierro sobre un imán.

Las *fulguraciones* o ráfagas son mucho más violentas que las protuberancias. Una fulguración es una erupción en la superficie solar que llega a su máximo en unos pocos minutos y que desaparece en una hora e incluso menos (**Chandrasekhar, 1967**). A lo largo de este tiempo, emite grandes cantidades de rayos X, ultravioleta, y radiación visible, así como corrientes de protones y electrones de alta energía. La temperatura en una fulguración puede llegar a los 500,000°K, y las observaciones en rayos X sugieren que pueden producirse algunas reacciones nucleares a esas temperaturas.

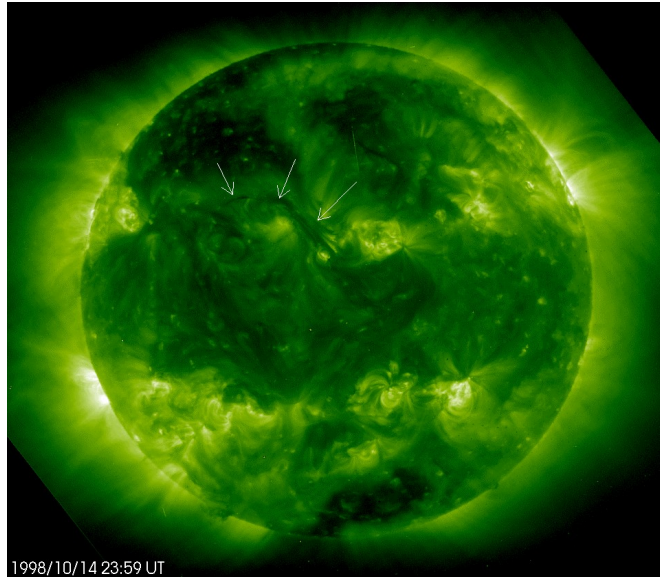


Imagen 1.3 Imagen de regiones activas en ultravioleta 14/Oct/1998 (Tomada del consorcio NOAA). Las flechas indican regiones activas.

Las fulguraciones solares parecen estar ligadas a los campos magnéticos. Siempre se producen en regiones cercanas a los grupos de manchas solares y pueden reproducirse una y otra vez en el mismo lugar. Un gran grupo de manchas solares puede experimentar hasta 100 fulguraciones a lo largo de un día, a pesar de que a lo largo de un año tan sólo alguna fulguración es suficientemente brillante para poder ser observada en luz visible. Diversas teorías sugieren que las fulguraciones se producen en asociación con fuertes inestabilidades del campo magnético de las regiones activas, el cual almacena gran cantidad de energía que es liberada de una sola vez. Las fulguraciones producen todo tipo de radiación electromagnética y corpuscular: desde ondas de radio hasta rayos gamma, pasando por luz visible, ultravioleta y rayos X, así como partículas de muy alta energía. Tanto éstas últimas como los rayos gamma indican la presencia de reacciones nucleares en la atmósfera solar (**Priest, 1988**).

Las fulguraciones solares pueden tener importantes efectos en la Tierra. La radiación X y ultravioleta llegan a la Tierra en sólo 8 minutos e incrementar la ionización de las capas más altas de la atmósfera terrestre. Esto causa una alteración en la reflexión de las señales de radio de onda corta y puede incluso absorberlas completamente, produciendo por tanto interferencias en las comunicaciones (**Carrillo, 2001**).

Otros eventos transitorios y de gran envergadura son las *eyecciones de masa coronal* (EMC), las cuales ocurren en grandes regiones magnéticas a cuyos pies se encuentran

regiones activas. Las eyecciones de masa coronal son poderosos estallidos que consisten en la expulsión repentina de nubes densas de plasma desde la atmósfera exterior del Sol, moviéndose a gran velocidad hacia el medio interplanetario (MI) (**González, 2000**). Sus tiempos característicos varían de minutos hasta horas, y su tamaño es de varios radios solares R_s . Se expanden radialmente desde el Sol, a velocidades del orden de decenas a cientos de kilómetros por segundo, en forma de un arco, una nube o en otras formas. Surgen en regiones de la corona solar que son magnéticamente cerradas (**Aguilar, 2001**). Las EMC juegan un papel importante en la evolución de la estructura de la corona solar y son el eslabón primario entre la actividad solar y los transitorios interplanetarios, así como las perturbaciones geomagnéticas.

La estructura básica de una EMC presenta tres componentes principales que son: un arco delantero (principal) brillante, seguido por una cavidad oscura de baja densidad y un núcleo brillante de material más denso. Los núcleos brillantes fueron observados en una cuarta parte de las EMC vistas por el satélite SMM (Solar Maximum Mission). La frecuencia de ocurrencia de éstas sigue el ciclo solar en fase y amplitud (figura 1.4).

Las implicaciones de estos fenómenos energéticos que provienen del sol, son indicativos de los cambios que estudian la posible relación entre el cambio climático y la variación del nivel de energía emitida por el Sol debida a su ciclo de actividad. Incluso pequeños cambios del nivel de energía que recibimos del Sol pueden afectar a los procesos químicos y físicos que tienen lugar en la parte alta de la atmósfera y provocar, a través de complejos procesos, cambios en el clima del planeta; esto último lo discutiremos en la sección 1.3.

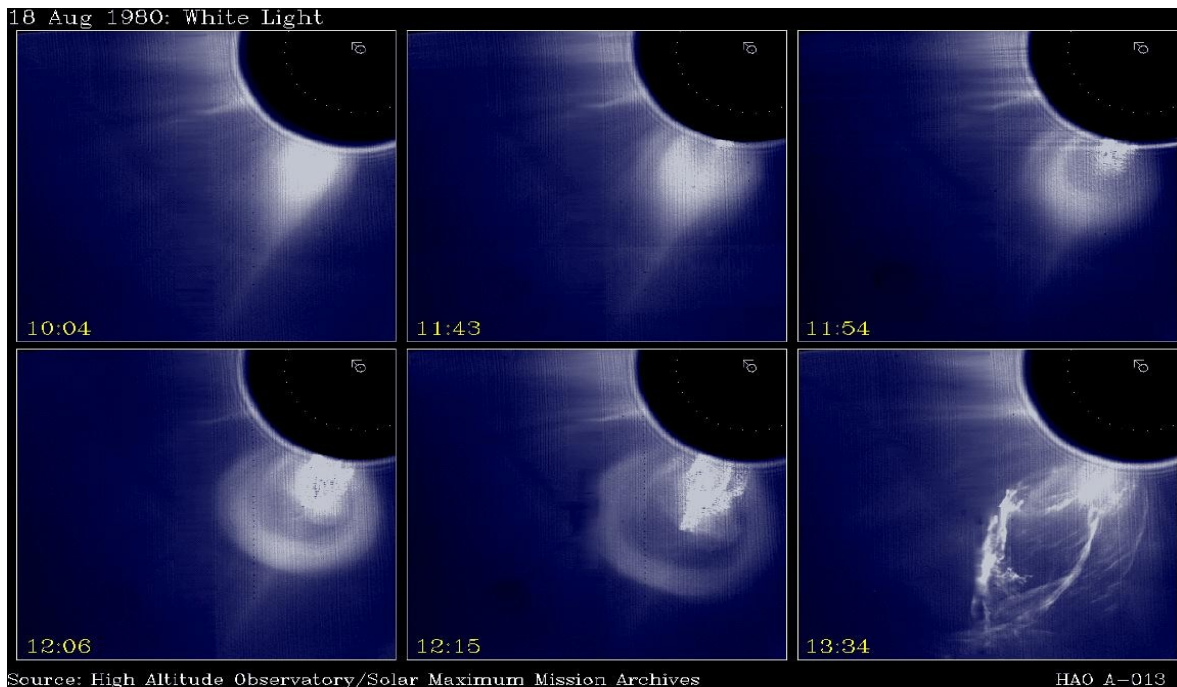


Figura 1.4 Evolución de una EMC. La imagen muestra el arco delantero, seguido por una cavidad oscura de baja densidad y un núcleo brillante; [tomada de Solar Maximum Mission Archives, 1980]

La Tierra la afecta, literalmente, lo que ocurre en el Sol. El estudio de los fenómenos físicos que ocurren en el Sol y su más que probable relación con el entorno terrestre pueden ayudarnos a entender y aminorar sus efectos. A esto que se le conoce como el clima espacial lo trataremos en la sección siguiente para conceptualizar la manera en que viajan, por decirlo de alguna manera, las manifestaciones de actividad solar que logran escapar del entorno solar.

1.2 EL VIENTO SOLAR Y CLIMA ESPACIAL

El medio interplanetario no está vacío sino que está permeado por un flujo continuo de partículas y campos magnéticos que se alejan radial y supersónicamente del sol, al cual se le llama *viento solar* (VS) que se expande más allá de la órbita de Plutón.

El medio interplanetario, que es la región que se encuentra entre el Sol y los planetas, aunque en algún momento se consideró como un vacío perfecto, se sabe ahora que un área dominada por el viento solar, el cual fluye a velocidades de entre 250 y 1000 Km/s. Las características del viento solar (su densidad, composición química y campo magnético entre otros) varían con los cambios que se presentan en el Sol. El efecto del viento solar

puede verse en las colas de los cometas (los cuales siempre apuntan alejándose del Sol). El viento solar fluye alrededor de cualquier obstáculo que se encuentra en su camino, como es el caso de los planetas. Bajo la influencia del viento solar las líneas de campo magnético son comprimidas en dirección al flujo que proviene del Sol y se alargan hacia mayores distancias, conforme el viento solar se va alejando del planeta [Dessler, 1967].

En la figura 1.5, que no está a escala, se representa una secuencia de una eyección de masa coronal, que se propaga a través del medio interplanetario y es detectada por un satélite localizado entre el Sol y la Tierra. Tiempo después, la nube "choca" contra el campo magnético de la Tierra provocando, en ocasiones, una tormenta geomagnética. La razón de que esto ocurra es debido a la formación de ondas de choque interplanetarias, que viajan a velocidades supersónicas, cruzando el medio interplanetario. Al encontrarse las ondas de choque con la magnetosfera terrestre, perturban el ambiente magnético de nuestro planeta y a lo que se encuentra en él.

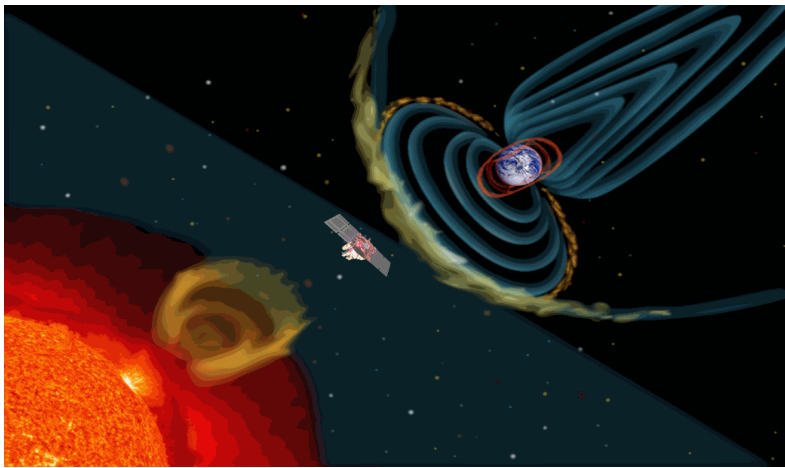


Figura 1.5 Las eyecciones de masa coronal son enormes nubes de plasma que provienen de la atmósfera superior del Sol.

El campo magnético de la tierra puede ser afectado por la velocidad, densidad y el campo magnético (su dirección) del viento solar. La interfase que separa el medio interplanetario de la magnetosfera terrestre es muy dinámica. Normalmente esta interfase llamada magnetopausa se extiende aproximadamente unos 10 radios terrestres en la dirección del Sol. Sin embargo, durante los periodos en que se tienen densidades y velocidades muy altas del viento solar, la magnetopausa puede ser empujada y comprimida hasta alrededor de 6.6 radios terrestres (altura equivalente a la cual están orbitando los satélites geoestacionarios). Como el magneto formado por el campo magnético de la tierra extrae energía del viento solar, se generan varios procesos internos, uno de los cuales es la tormenta geomagnética.

Todo esto ha conducido a la definición del término clima espacial para definir el estado de perturbación del ambiente entre la Tierra y el Sol [**Ananthakrishnan et al, 1980**]. La importancia de su estudio y predicción se debe a que algunos sistemas tecnológicos ya sea en el espacio o en la tierra han sido afectados por esta interacción del viento solar con la magnetosfera. Por eso la necesidad de poder predecir perturbaciones grandes tales como las tormentas geomagnéticas.

La magnitud de una perturbación geomagnética se puede estimar usando información sobre las características del viento solar que se aproxima hacia la magnetopausa (la frontera entre la magnetosfera terrestre y el viento solar), mediante modelos computarizados que en pocos minutos pueden hacer una predicción de lo que le pasaría a la magnetosfera a la llegada de ese viento (figura 1.5). Así pues es posible establecer un sistema de alarma espacial si se dispone de satélites que estén fuera de la magnetosfera entre el Sol y la Tierra y tomando datos del viento solar por medio de estaciones terrestres como los radiotelescopios.

1.3 **RELACIÓN SOL-TIERRA**

La idea de que los fenómenos que ocurren en el Sol y en la Tierra son independientes uno del otro, se ha ido abandonando conforme las investigaciones de estos fenómenos se han profundizando.

Algunos de los efectos que se manifiestan en la tierra, debido a la actividad dinámica del Sol, son: las auroras (boreales y australes) y las tormentas geomagnéticas entre otros. De estas manifestaciones, las tormentas geomagnéticas, son las que causan mayores problemas a la Tierra. El encuentro entre nubes magnéticas expulsadas por el Sol y el campo magnético terrestre desencadena violentas fluctuaciones en los niveles de magnetismo terrestre (tormentas geomagnéticas), que llegan a interrumpir e incluso dañar sistemas de comunicación o líneas de transmisión de energía eléctrica. Ciertas nubes logran abrir el escudo geomagnético e inyectan sus partículas energéticas, produciendo una excitación de los sistemas de corriente eléctrica ubicados en la cavidad magnética terrestre (**Altschuler, 1969**).

Efectos de las Tormentas Geomagnéticas en la Tecnología

Hasta principios de los años 1990 se atribuía a las fulguraciones solares la ocurrencia de las tormentas geomagnéticas. La opinión más aceptada en estos tiempos es que son las eyecciones de masa coronal (EMC) las responsables de estas tormentas. Se trata como ya mencionamos en la sección 1.1, de erupciones en la corona solar que arrojan al espacio miles de millones de toneladas de partículas cargadas eléctricamente a velocidades superiores al viento solar corriente. La combinación del viento solar con las EMC al impactar con el campo magnético terrestre produce las ya mencionadas tormentas geomagnéticas. El conjunto de posibles efectos sobre nuestro planeta se ilustran en la figura 1.6. y las describiremos enseguida.

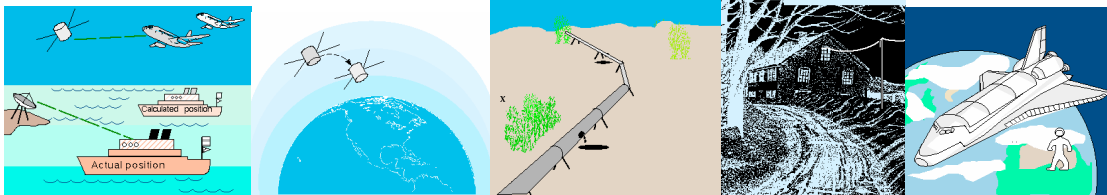


Figura 1.6 Algunos sistemas alterados como consecuencia directa o indirecta por los fenómenos asociados con la actividad solar

Sistemas de Distribución Eléctrica

La variación del campo magnético terrestre debida a una tormenta geomagnética, inducirá una circulación de corriente eléctrica en toda la atmósfera y el subsuelo. Estas corrientes inducidas fluyen desde la tierra hasta las subestaciones eléctricas y tienen una frecuencia muy baja comparada con las corrientes AC, con la que trabajan los transformadores. Propiamente, una corriente inducida por una tormenta magnética se puede considerar como una corriente de DC, con algunas pequeñas variaciones. Esto hace que al llegar estas corrientes a un devanado del transformador ocurra una extramagnetización, lo cual trae como consecuencia que los medios ciclos de magnetización de AC coincidan debido a la corriente de DC inducida, produciendo así la saturación del transformador.

Las altas corrientes inducidas en los devanados del transformador del orden de algunos millones de amperes, producirán un calentamiento en el embobinado que lo llevará a la destrucción. Durante la tormenta magnética del 13 de marzo de 1989 en la ciudad de Quebec, se tuvieron daños en el sistema eléctrico de aproximadamente \$13.3 millones de dólares. En la misma tormenta un transformador de una estación de generación nuclear

localizada en Salem, New Jersey, fue dañada, teniendo su reparación un costo de 17 millones de dólares.

Sistema de Tuberías

El daño en un sistema de tubería que transporta petróleo, gas o agua resulta muy costoso por los tramos tan grandes que se necesita para conformar una red de tuberías, pero sobre el costo económico está la dependencia de las vidas humanas con respecto al agua o los energéticos que transporten estos ductos.

Debido a que las diferentes tuberías están expuestas a medios distintos, como por ejemplo agua, sol, viento, etc. aparecerá la corrosión electroquímica en las paredes metálicas, la cual deteriora la resistencia de las paredes produciendo la ruptura de los ductos debido a la presión de los fluidos transportados. Para lograr la eliminación de la corrosión, se aplica un recubrimiento aislante en las paredes metálicas de los ductos y además se conectan dispositivos especiales llamados rectificadores catódicos de protección.

La idea de estos dispositivos es mantener una diferencia de potencial constante entre las paredes del ducto y su entorno, evitando la corrosión. Este proceso se conoce como *protección catódica* y consiste en conectar una fuente de voltaje de DC al ducto, haciendo coincidir el polo negativo con las paredes del ducto y el polo positivo se conecta a su entorno.

Las variaciones del campo magnético terrestre provocadas por una tormenta magnética, inducirán corrientes eléctricas intensas, que en el ramo de los ductos reciben el nombre de “corrientes telúricas”, causando que el nivel de voltaje entre el ducto y su entorno varíe, teniendo como consecuencia que el sistema anticorrosión opere en niveles de voltaje críticos, incrementando la posibilidad de corrosión y disminuyendo el tiempo de vida de los ductos por posibles facturas debidas a corrosión.

Sistemas GPS

El sistema GPS (Global Positioning System) está conformado de una constelación de satélites, que proporcionan la ubicación de cualquier elemento que sea usuario de esta red satelital. Cuando ocurre una tormenta magnética algunas de las partículas de alta energía provenientes del Sol que logran penetrar la magnetosfera terrestre, interaccionan con las componentes de la ionosfera provocando perturbaciones y variaciones en la densidad electrónica. Entonces la señal electromagnética llegará con un retardo mayor al que hubiera

tenido si la densidad de la ionosfera no hubiera variado en proporciones como las producidas por una tormenta magnética.

Este efecto en la ionosfera tiene como consecuencia que los de satélites reciban la señal con diferentes retardos, estimando una posición con cierto rango de error que resulta de suma importancia para sistemas de navegación, aviación, de interés científico, etc., en donde se requiere de mediciones de alta precisión.

Sistemas Satelitales

Las partículas de alta energía que son arrastradas por las Eyecciones de Masa Coronal y que logran penetrar la magnetosfera pueden dañar a los satélites de comunicaciones ya que la mayoría de estos se encuentran orbitando dentro de esta coraza magnética. Estos daños se pueden suscitar cuando algunas de estas partículas penetran el cuerpo del satélite, o indirectamente cuando el flujo de partículas induce campos en su estructura provocando descargas. Estos tipos de problemas en los satélites son perceptibles desde la Tierra cuando se tienen comandos fantasma, daño en la electrónica, pérdida de control y algunas fallas más.

Cuando un ión con alta velocidad atraviesa algún dispositivo conformado por semiconductores, produce pares electrón-hueco que se pueden generar en regiones sensitivas del sistema electrónico, como celdas de memoria, alterando la información o produciendo comandos fantasma.

Antes de 1994 se ignoraba que los satélites podrían sufrir daños cuando partículas de alta energía eran emitidas desde el Sol durante algún evento explosivo. Sin embargo en enero de 1994, tres satélites geoestacionarios sufrieron fallas en circuito de control de estabilidad. Los servicios fueron afectados por horas, y uno de los satélites no se pudo recuperar. Lo que desconcertó a las personas a cargo del control de las naves, es que no se dio aviso de que hubiera ocurrido algún evento explosivo solar. Entonces los daños se atribuyeron a un flujo continuo de partículas de larga duración durante un mínimo de manchas solares. Lo que resulta importante en la predicción del daño a satélites es la intensidad de los electrones a los que están expuestos los satélites y el flujo integrado total de partículas.

Otro tipo de daño a los satélites es debido a un fenómeno conocido en inglés como Deep Dielectric Charging, en donde los electrones de alta energía procedentes de alguna perturbación del viento solar penetran en la coraza del satélite y se comienzan a acumular en los materiales dieléctricos, así como en las tarjetas de los circuitos, y en el dieléctrico de los cables coaxiales. La acumulación de cargas propicia que se genere un campo

eléctrico muy intenso, el cual al exceder la constante dieléctrica de rompimiento del material produce descargas repentinas. Estas descargas dañarán el sistema, quemando componentes y destruyendo los semiconductores.

Sistemas de Comunicaciones por Cable

Desde los inicios de la comunicación por telégrafo, los ingenieros telegrafistas se percataron de las perturbaciones ocasionadas en el sistema de comunicación debido a una aurora. Con el objetivo de proteger un mensaje de una posible pérdida de contenido, se ideó un sistema químico que hacía las veces de una memoria, es decir, las corrientes eléctricas provenientes del mensaje causan una reacción química, dejando un color particular en un papel de registro. El tipo de color y la intensidad daba cuenta del tipo de carácter transmitido (**Balanis, 1982**).

Para la tormenta magnética del 19 de febrero de 1852, se tienen registros de la inducción de una corriente eléctrica muy intensa en los cables telegráficos, a tal grado que al querer captar los mensajes provenientes, en la memoria química se obtuvo un incendio en los papeles de registro.

Cuando ocurre una variación en el campo geomagnético se induce corriente intensa de DC que se puede sumar o restar con la corriente de alimentación para el funcionamiento de los amplificadores. Esta variación puede ocasionar la saturación, destrucción del amplificador, o un nivel de amplificación que no sea suficiente para que el mensaje termine su recorrido. Del mismo modo las corrientes inducidas por tormentas geomagnéticas afectan las comunicaciones por cables continentales y submarinos.

Aunque las fibras ópticas son inmunes a la interferencia de campos electromagnéticos, se requieren amplificadores ópticos que necesitan de un nivel de voltaje de alimentación de DC para operar, y de igual modo que para los sistemas de cable, los niveles de amplificación son dependientes del voltaje de DC suministrado, el cual puede estar expuesto a variaciones debido a perturbaciones del campo geomagnético [IPS Radio and Space Australian Services].

CAPITULO 2

RADIOTELESCOPIOS Y CIP

En este capítulo se tratarán conceptos como la definición y descripción de un radiotelescopio, así como la ubicación de algunos radiotelescopios en el mundo, mencionando sus características físicas y técnicas de operación. También se hace referencia a la técnica de centelleo interplanetario y sus aplicaciones, técnica que utilizará el Radiotelescopio de centelleo Interplanetario de Coeneo, Michoacán (MEXART), cuando este operando al cien por ciento.

2.1 RADIOTELESCOPIOS

Comenzaremos por definir el término antena: una antena puede definirse como un **transductor** es decir, aquella estructura asociada con la región de transición entre una onda electromagnética guiada (línea de transmisión) y una onda electromagnética propagándose en el espacio libre. La antena es un dispositivo que se utiliza como interfase entre un transmisor y el espacio libre, o entre el espacio libre y el receptor.

Cada diferentes tipos de antenas (cilíndricas, parabólicas, lineales, dipolares, etc), tienen las siguientes características:

Tiene una impedancia de entrada: Es la impedancia que representa la antena cuando se conecta a un transmisor o receptor (ohm).

Patrón de radiación: Se presenta gráficamente representando la distribución relativa de potencia en función de coordenadas espaciales, es decir el patrón angular de la radiación que transmite o recibe en cada dirección (dB).

Ganancia o directividad: Es decir, la radiación que recibe o transmite en una dirección comparada con la que transmitiría una antena isotrópica (que irradia en todas direcciones).

Área efectiva: Una red, eléctricamente hablando que es capaz de recibir una radiación de objetos celestes (m^2).

Ancho de banda: La capacidad de la antena de recibir información con diferente frecuencia (Hz).

Polarización: La dirección de polarización se define como la dirección del vector campo eléctrico. Cuando se dice que las antenas son linealmente polarizadas se dice que la dirección del vector campo eléctrico es vertical u horizontal.

La atmósfera y la ionosfera de la Tierra, son opacas a casi la mayor parte de las ondas electromagnéticas dentro del espectro electromagnético, excepto en dos ventanas: una de

estas es la ventana del visible e infrarrojo cercano y la segunda es la ventana de ondas de radio. La banda de radio es sólo una parte del espectro electromagnético. La ventana de ondas de radio se extiende desde longitudes de onda que van de 1 cm a los 20 m, siendo delimitadas las longitudes de onda corta por la absorción molecular y longitudes de onda grande por la reflexión ionosférica. Los radiotelescopios observan a través de esta ventana de radio, y cualquier antena empleada para tales observaciones celestes se le puede llamar antena radiotelescopio.

2.1.1 DEFINICIÓN Y FUNCIONES DE UN RADIOTELESCOPIO

La diferencia entre un telescopio óptico (visible e infrarrojo) y un radiotelescopio, es que en el primer caso se detecta la intensidad de las ondas, y en el segundo caso se detecta la información de la onda con todo y fase. Otra diferencia es que en el óptico se registra imágenes directamente en el foco del telescopio, ya que existen detectores bidimensionales como los CCDs, mientras que en el radio, generalmente se tiene un detector monodimensional.

Con el desarrollo de la radioastronomía, los científicos adaptaron las técnicas de radar para construir radiotelescopios. Un radiotelescopio consiste de una antena para captar ondas de radio celestes y un receptor muy sensitivo que permita detectarlas y grabarlas. Haciendo una analogía, la antena sería el lente del objetivo o espejo de un telescopio óptico, mientras que el receptor con el graficador, sería el ojo o placa fotográfica (ver figura 2.1).

Al sistema completo antena, receptor y graficador se le conoce como “radiotelescopio”, aunque en realidad este tenga muy poco parecido físico con su contra parte óptica. Los radiotelescopios son usados en muchos casos como un telescopio astronómico ordinario, es decir, para la observación y estudio de la emisión de cuerpos extraterrestres. Sin embargo, en longitudes de radio el cielo presenta una apariencia totalmente diferente a la que se aprecia en el espectro óptico (**Kraus, 1966**).

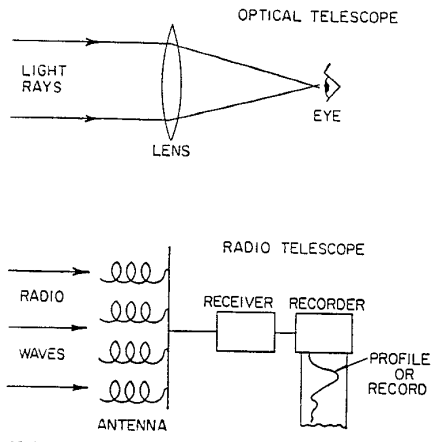


Figura 2.1 Analogía entre un radiotelescopio y un telescopio óptico(Tomado de Kraus,1966).

Un radiotelescopio convierte la información de las ondas electromagnéticas en un voltaje y al final en una potencia y es utilizado en radioastronomía para estudiar las radiofuentes en la bóveda celeste. Los radiotelescopios tienen antenas muy grandes y sólo emplean los receptores más sensibles. Las débiles fuentes astronómicas son fácilmente enmascaradas por las interferencias terrestres, por lo que se realizan grandes esfuerzos encaminados a proteger los radiotelescopios de las interferencias producidas por el hombre.

Nuestra galaxia se asemeja a un disco con núcleo con dimensiones relativas a 30 kpc, un *parsec* es la distancia de un objeto si el paralaje es de 1 segundo de arco ó si el ángulo entre sol – estrella – tierra = 1”, en ella existen alrededor de 10^9 estrellas, estas estrellas tienen diferentes características (tamaño, color, temperatura, luminosidad, masa, etc), que un radiotelescopio trata de describir con la información que recibe en ondas de radio.

Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para un radiotelescopio son la potencia, brillo y resolución angular entre otros. La potencia es la radiación incidente sobre un diferencial de área (dA), por unidad de frecuencia (du), proveniente de un diferencial de ángulo sólido (de):

$$dw = B \cos i \ d \ dA \ dd$$

Donde dw = diferencial de potencia (watts)

de = diferencial de ángulo sólido (rad^2)

dA = diferencial de área

dd = diferencial de frecuencia, es decir, que ancho de banda espectral se observa.

i = ángulo entre d y el zenit

$B = \text{brillo del cielo en la dirección } \theta, (\text{watts/ m}^2) \text{ Hz}^{-1} \text{ rad}^{-2}$

La portencia en términos de ingeniería eléctrica se define como:

$$1 \text{ dB} = 10 \log (P_{\text{potencia } A} / P_{\text{potencia } B})$$

para considerar la magnitud de una estrella con respecto a una estrella de referencia:

$$1 \text{ mag} = 10 \log (100^{1/5}) \text{ esto es, } 1 \text{ mag} = 4 \text{ dB.}$$

Brillantez, en general se tiene que el brillo es función de la dirección a la que se apunta, es decir, $B(\theta, \phi)$, sin embargo en una situación real se tendrá una antena que presente un área efectiva, A , y un patrón de radiación dado por $P_n(r, \theta, \phi)$, de este patrón de radiación de la antena se discutirá en el capítulo 3, en síntesis diremos que es el patrón angular de una antena cuando esta recibe. Cuando un radiotelescopio observa una fuente con una distribución de percepción dada por $P_n(i, r)$ podríamos decir que es una función de “peso”, es decir, le asigna un peso a la brillantez del objeto.

En este sentido decimos que el instrumento no provee la verdadera imagen de un objeto si no que proporciona un resultado que es la convolución de la respuesta del instrumento ($P_n(P, u)$) con la verdadera brillantez del objeto ($B(i, \theta, \phi)$), asignándole un “peso” a las diferentes partes del objeto, en especial si este es un objeto extendido, en síntesis, la brillantez observada es igual a la densidad de flujo observada.

Uno de los principios de la radioastronomía, es la de obtener o ser capaz de detectar radiación débil de diferentes objetos en el universo y obtener lo mejor posible detalles de dicho objeto para reconstruir una imagen del mismo, es decir, la resolución angular de un radiotelescopio. Para un radiotelescopio parabólico que presente una apertura circular de diámetro “ d ”, la resolución angular sería:

$$d \sim \lambda / \theta$$

O sea θ , es el ancho o potencia media del haz principal del patrón angular de la antena.

La necesidad de conseguir mejores resoluciones angulares, llevaron a desarrollar una técnica que se conoce como síntesis de apertura. Esta técnica se refiere al hecho de que una apertura está siendo sintetizada, simulada ó reconstruida en partes, también considera la observación simultánea del objeto por 2 o más antenas distribuidas sobre una gran área. A este tipo de instrumento se le conoce como radio interferómetro, consiste en analizar el patrón angular de recepción de una antena sencilla, donde lo que importa es conocer cuál es

la apertura de radiación incidente, dicha apertura se define como la el área delimitada por las “paredes” de la antena sobre un plano perpendicular a la antena, la distribución del campo eléctrico de sobre esta apertura es la que determina el patrón angular de la antena.

Un ejemplo ilustrativo sobre la manera de hacer imágenes con un radiotelescopio es mapear en el medio interplanetario (MI) una fuente de radio como una forma de caracterizar las estructuras allí presentes en el medio (densidad, temperatura, etc), su relación con los radiotelescopios es el uso que estos dan a las señales obtenidas por ellos (figura 2.2), se amplifican y grafican en un trazado llamado perfil (1) que representa su intensidad. El área bajo la curva de ese perfil (2) determina la intensidad de emisión de determinada región, de esta manera se obtienen los perfiles de diferentes zonas del cielo (3), por último las áreas de intensidad se traducen en números a los cuales se les asigna un determinado color y se grafican para obtener imágenes (4) las cuales son originadas en el mapeo de frecuencias por fuera de la banda visible del espectro electromagnético.

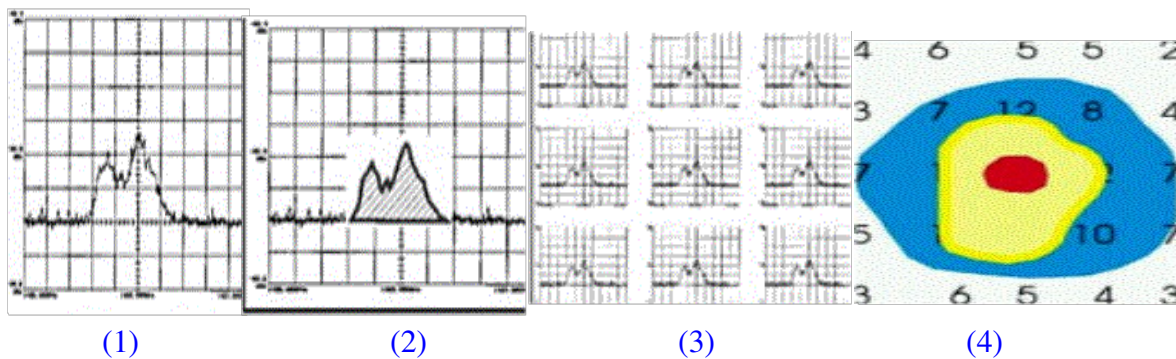


Figura 2.2 Gráfico ilustrativo al procedimiento al registro de una fuente de radio, en donde se representa la amplitud, intensidad, perfil de diferentes zonas del cielo y su intensidad en colores. Tomada de www.igeofcu.unam.mx.

En general, el radiotelescopio ideal debe ser capaz de proporcionar la información mas completa y precisa de los parámetros de una fuente de radio como son:

*** La distribución espacial de las ondas de radio de la fuente en el cielo.

*** La potencia total de flujo de la fuente

*** La polarización y en caso de que la fuente sea extensa, la manera en la cual ésta varía con la posición.

*** La dependencia del flujo de potencia en función de la frecuencia, esto es, el espectro.

*** La variación de la posición, flujo de potencia, polarización y modulación con el tiempo, el cual puede ser debido al movimiento y variabilidad en la potencia de la fuente.

Los primeros tres puntos son de suma importancia conocerlos para brindar información precisa de la operación y calibración del instrumento.

A continuación veremos la ubicación y características de operación de algunos radiotelescopios en el mundo, que se dedican al estudio de radiofuentes provenientes del espacio interestelar.

2.1.2 RADIOTELESCOPIOS EN EL MUNDO

Ooty Radio Telescope ORT

El Radiotelescopio de Ooty (figura 2.2), fue creado por radioastrónomos del TIFR (Tata Institute of Fundamental Research) en las colinas Nilgiri, en el sur de la India en 1970. El radiotelescopio es un cilindro parabólico con un eje de 530 m de largo y 30 m de ancho, operando a una frecuencia nominal de 326.5 MHz y un ancho de banda máximo de 15 MHz.



Figura 2.2 Radiotelescopio de Ooty, ubicado en las colinas de Nilgiri, construido desde 1970 y en la actualidad sigue en funcionamiento trabajando en conjunto con el GMRT (Giant Meterwavelength Radio Telescope) localizado cerca de Pune, India [Tomada de www.ncra.tifr.res.in].

La superficie reflectora del telescopio está hecha de 1100 alambres de acero delgado dispuestos en forma paralela con respecto a la longitud del cilindro, siendo sostenidos por 24 soportes parabólicos. Un arreglo de 1056 dipolos de media longitud de onda en frente de un reflector de corneta de 90° , forman la alimentación primaria del radiotelescopio. Las señales son recibidas en grupo de 48 dipolos para después ser sumadas vectorialmente y formar 22 grupos de salida, cada uno conocido como módulo.

El radiotelescopio de Ooty comenzó operaciones en 1970 y ha continuado trabajando produciendo resultados astronómicos importantes, en radiogalaxias, cuasares, supernovas, pulsares, medio interestelar e interplanetario. Uno de los programas de observación más exitoso durante muchos años en Ooty fue determinar la estructura angular de cientos de radiogalaxias y cuasares mediante la técnica de la ocultación lunar [Tata Institute for Fundamental Research, 2002]. El radiotelescopio es actualmente usado para estudio de pulsares, líneas de radio, recombinación y centelleo interplanetario.

Solar Terrestrial Environment Laboratory STEL

Con la finalidad de explorar y tratar de conocer más acerca del viento solar, se construyó un radiotelescopio en la banda de frecuencias UHF, llamado STEL (Solar Terrestrial Environmental Laboratory). Este radiotelescopio consiste de 4 arreglos de antenas las cuales están localizadas en Toyokawa, Fuji, Sugadaira y Kiso, todas en Japón (figura 2.3).

Cada arreglo de antenas está compuesto de 5 antenas reflectoras parabólicas cilíndricas que trabajan a la frecuencia central de 327 MHz, con un ancho de banda máximo de 100 MHz. El sistema de adquisición de datos tiene un tiempo de integración de 100 ms. Con respecto a los sistemas receptores, se estima la temperatura de la antena para cada una de las 4 estaciones teniendo así una estimación de la sensibilidad para cada una. El concepto de temperatura de la antena no tiene nada que ver con la temperatura física de la antena, es decir que está no determina la temperatura de su radiación. Esta temperatura queda determinada por la región emisora que la antena es capaz de detectar con su patrón angular.



Figura 2.3 Imagen de la ubicación en Japón de las 4 estaciones que forman el STEL. Se muestra la distancia (Km.) de separación entre ellas. [Tomada de www.stelab.nagoya-u.ac.jp].

European Incoherent Scatter Radar EISCAT

La asociación científica EISCAT es una organización internacional de investigación que es encargada del funcionamiento y análisis de información de un sistema de radares de investigación que trabajan con el principio de dispersión incoherente, una sonda ionosférica en el norte de Escandinavia. Este grupo de investigación esta conformado por Noruega, Suecia, Finlandia, Japón, Francia, Reino Unido y Alemania.

Los radares de EISCAT (figura 2.4), están diseñados para funcionar usando la técnica de dispersión incoherente, por medio de la cual se puede estudiar la ionosfera de la Tierra y sus interacciones con la parte alta de la atmósfera. Además se pueden lograr estudios de la magnetosfera terrestre, medio interplanetario y del viento solar.



Figura 2.4 Estación de Tromso [Tomada de www.eiscat.com].

El sistema de radares EISCAT se compone de 4 radares situados en Tromso, Sodakyla y Kiruna. En la estación que se localiza cerca de la ciudad de Tromso, Noruega; se tiene un sistema receptor funcionando en la banda de frecuencias UHF (928 MHz, tronso, Sodakyla y Kiruma) y el transmisor opera en la banda VHF (224 MHz, tromso). La radiación captada por las demás estaciones es proveniente de la estación Tromso. La sede del EISCAT se encuentra en Kiruna, Suecia.

2.2 TÉCNICA DE CENTELLEO INTERPLANETARIO

La técnica del centelleo (figura 2.5) emplea observaciones de fuentes de ondas de radio, realizadas con radiotelescopios para generar mapas diarios del cielo que permiten hacer una detección y seguimiento de las perturbaciones de gran escala que se propagan en el viento solar, esto es, cuando las ondas de radio viajan con dirección a la tierra e interactúan con las perturbaciones causadas por el sol dichos frentes de onda llegan a la tierra distorsionados por éste lo que nos da un indicativo de qué tan perturbado están ciertas regiones en el medio interplanetario. La técnica del centelleo se aplica con base en el estudio de variaciones oscilantes que representan el flujo o intensidad de señal de una fuente de radio captada por un radiotelescopio. A la variación oscilante del flujo se le denomina centelleo (Kraus, 1966).

La fuente natural de radio emite frentes de onda que interactúan con el viento solar, el cual los deforma, sobre todo en presencia de perturbaciones de gran escala. En estos casos puede decirse que el medio interplanetario está poblado por una serie de burbujas de gran

densidad que están siendo expulsadas del Sol. Esta deformación de los frentes de onda forman un patrón de interferencia, que es el que corresponde al tintileo, ahora denominado *centelleo interplanetario*. La observación de este centelleo permite estudiar la presencia de perturbaciones de todas las escalas de tamaño en el viento solar. En particular, las que son de gran tamaño como las EMC, cuando se mueven en dirección de la Tierra, pueden producir tormentas geomagnéticas y otros procesos energéticos en la atmósfera de nuestro planeta (como auroras y perturbaciones ionosféricas).

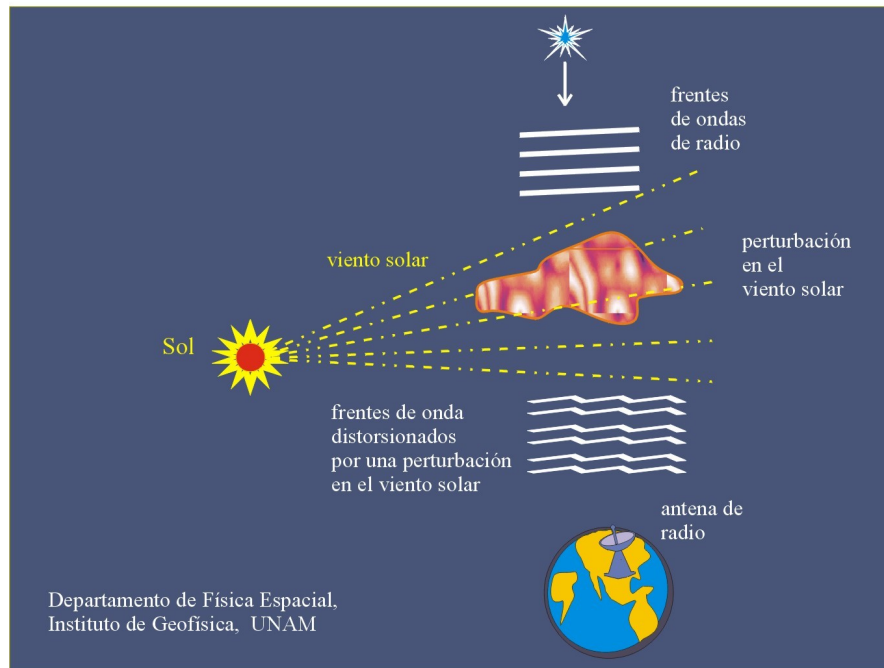


Figura 2.5 Esquema que ejemplifica la técnica de centelleo interplanetario, de donde se puede observar que las señales provenientes de alguna fuente estelar recibidas por un radiotelescopio, poseen una amplitud constante, siempre y cuando la línea de visión radiotelescopio fuente, no contenga alguna perturbación en el medio interplanetario [Tomada del Departamento de Física Espacial, Instituto de Geofísica, UNAM].

El centelleo de una fuente de radio es función de la elongación solar A (ángulo entre el sol, la tierra y la fuente), Este ángulo presenta una variación de paroximadamente un grado por día debido al movimiento orbital de la tierra (figura 2.6). La fluctuación en la densidad del viento solar ΔN_e con respecto a la distancia del sol R , está relacionada como $\Delta N_e = 1/R^2$. Como se ve en la expresión anterior la disminución rápida de la densidad de partículas en un plasma hace que a distancias cercanas a la línea de visión tierra-sol, se tenga una región efectiva de dispersión, con lo cuál se lograría un máximo de centelleo en las regiones cercanas al sol.

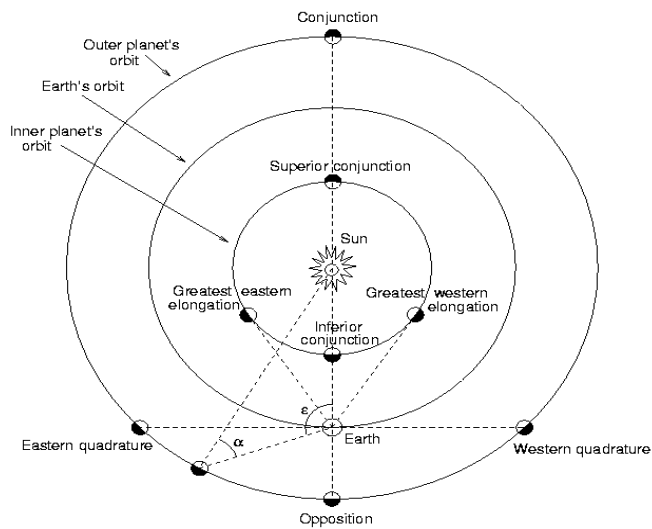


Figura 2.6 Diagrama que ilustra la elongación o ángulo de la posición de la tierra con respecto al sol.
(tomada de www.es.wikipedia.org)

En el estudio de la actividad solar sobre la magnetosfera terrestre, el centelleo interplanetario es una herramienta que se puede utilizar para estudiar la estructura de la heliósfera y el monitoreo perturbaciones de gran escala que se originan en el sol, como las eyecciones de masa coronal. El radiotelescopio de Centelleo Interplanetario, de Coeneo, Michoacán (MEXART), este terminado aplicará esta técnica para el seguimiento de varias fuentes de radio en tiempo real, por no ser esencia de este trabajo la técnica de centelleo no se profundizará mas en ella, pero si vale la pena considerar que el instrumento está diseñado para aplicarla.

ÍNDICE DE CENTELLEO

Los parámetros que proporcionarán información acerca del viento solar, obtenidos mediante la técnica del centelleo interplanetario son: Espectro de potencia, que da información sobre el espectro del número de onda de las fluctuaciones de densidad en el plasma en el régimen de microescala $\geq 10^3$ (Coles, 1974).

Una magnitud cuantitativa de la dispersión de las ondas electromagnéticas en el viento solar, es el *índice de centelleo* (g), es decir, el índice que nos da información sobre la densidad en el viento solar, en otras palabras el indice mide la densidad del plasma en una estructura definida del medio interplanetario. Con la velocidad del patrón de difracción se puede estimar la velocidad del viento solar como:

$$g = (\Delta S_{\text{Obs}}) / S_{\text{prom}},$$

donde ΔS_{obs} es el centelleo observacional o flujo rms de la señal y S_{prom} es el centelleo promedio asociado a un viento solar quieto. La magnitud de g proporciona una estimación bastante confiable de la densidad media del plasma [Hewish, 1987].

Suponiendo que se puedan realizar dos observaciones para la misma fuente de radio, en dos diferentes sitios que sean paralelos al viento solar, los patrones de centelleo observados en cada lugar serán muy similares. Considerando un intervalo de tiempo de observación el retraso entre los picos más prominentes de la señal adquirida, la distancia entre los puntos en donde se realizaron los registros de centelleo se puede lograr una estimación de la velocidad del viento solar. Cabe mencionar que esta es sólo una técnica para encontrar este parámetro del viento solar.

El centelleo revela fluctuaciones en la densidad del medio interplanetario, con lo cual se pueden producir mapas del cielo en donde se muestra las regiones en donde el viento solar es más denso (figura 2.6). El plano de la eclíptica coincide con el plano del papel con el Sol en el centro. El centelleo se expresa por medio del índice, en una escala logarítmica, en donde los colores más oscuros corresponden a un índice g bajo, lo que implica que en esa región la densidad del viento solar es muy pobre. Para las zonas de color más claro se tiene un índice g alto, con densidad de viento solar grande.

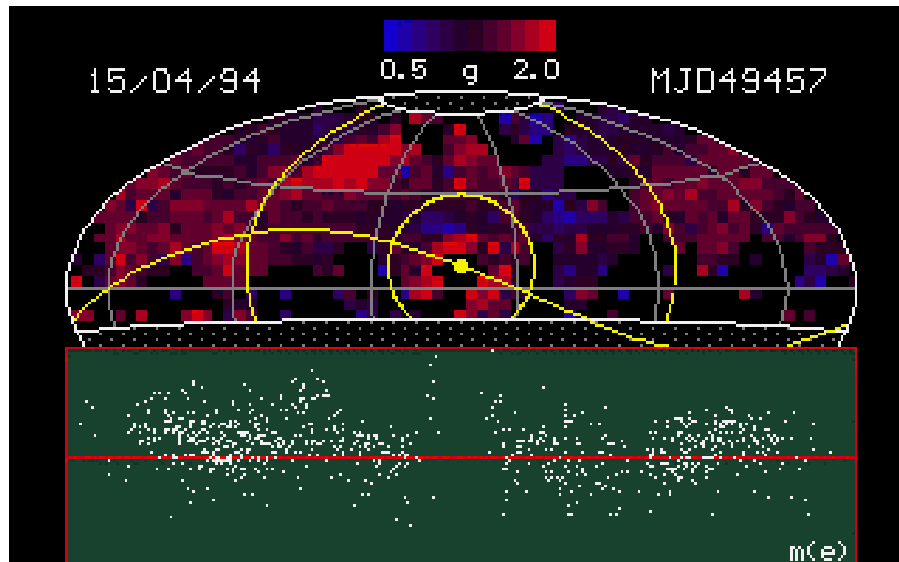


Figura 2.6 Mapa de centelleo en una proyección Hammer-Aitoff, donde el plano de la eclíptica coincide con el plano del papel con el Sol en el centro. Los puntos más claros indican un índice de centelleo alto, mientras que los puntos más oscuros indican una baja densidad de viento solar [Tomada de www.radio.astro.gla.ac.uk].

Una amplia serie de estudios de centelleo interplanetario, ha permitido calibrar la turbulencia asociada con un viento solar no perturbado, lo cual permite distinguir la existencia de estructuras de gran escala en el viento solar, identificadas por una turbulencia mayor o, en término práctico, con un centelleo más intenso (figura 2.7).

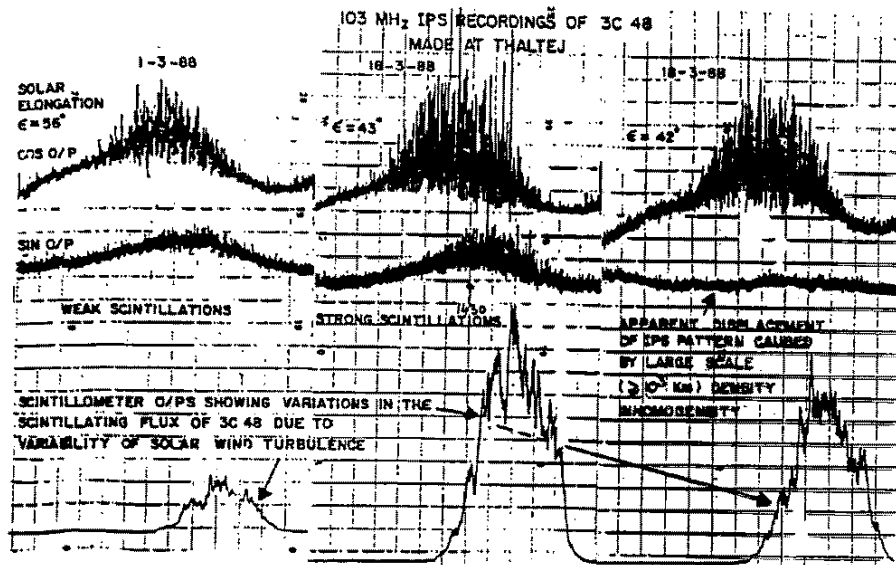


Figura 2.7 Registro de centelleo, obtenidos por Ooty Radio Telescope ORT. Se muestra la variación en intensidad de una radiofuente.

Uno de los propósitos del radiotelescopio, cuando este operando al cien por cierto, es elaborar mapas sobre las fluctuaciones en la densidad del medio interplanetario, utilizando la técnica de centelleo, hasta la realización de este trabajo se cuenta con $\frac{1}{4}$ del total de las antenas para su operación en la adquisición de señal.

Un índice de centelleo con valor unitario ($g=1$) se relaciona con un centelleo asociado a un viento solar quieto, y si el índice g es mayor a la unidad se relaciona con regiones de viento solar de densidad mayor a la del viento solar quieto.

Con los antecedentes descritos en éste capítulo sobre radiotelescopios y la mención de algunos de ellos, en el siguiente capítulo describiremos la estructura física y técnica del MEXART, así como los procedimientos que llevan a formar patrones de radiación necesarios para “observar” fuentes de radio.

CAPITULO 3

EL MEXART

(Arreglo de antenas mexicano)

En México el proyecto de construcción de un radiotelescopio para detectar perturbaciones en el MI está ubicado en el municipio de Coeneo en el estado de Michoacán (figura 3.1). Su objetivo principal es el rastreo de perturbaciones transitorias de gran escala que viajan desde el Sol hacia la Tierra, mediante la técnica de centelleo interplanetario. Las primeras observaciones de estas fuentes, incluyendo el Sol, y que constituyen el propósito principal de esta tesis, serán descritas en el capítulo 4, por tanto nos concentraremos en la descripción del radiotelescopio en sus diferentes modalidades como son su infraestructura, constitución y elementos que lo componen, así como su respuesta electromagnética en su conjunto para calibrar con base en observaciones de fuentes de radio sus líneas de transmisión ó antenas.

Cabe mencionar que hasta la conclusión de este trabajo el estado que guarda la construcción del radiotelescopio en todos sus aspectos cuantitativos, se considera un avance del 90%, las primeras calibraciones a 139.0 MHz, considerando las fuentes de radio Cygnus A, Cassiopea, Nebulosa del Cangrejo, Virgo A y el sol, utilizando las líneas antenas 7, 9 y 11 del radiotelescopio, no tiene el propósito de ser comparadas con las observaciones hechas por otros observatorios del mundo, sino sentar un antecedente de las calibraciones de estas antenas. De lo anterior citamos que el trabajo presentado no tiene el fin de tratar temas relacionados con el clima espacial ni actividad solar.

3.1 INFRAESTRUCTURA FÍSICA DEL MEXART

En la construcción del MEXART intervienen, aparte de la UNAM, varias instituciones nacionales y extranjeras. Entre las de la UNAM se encuentra, como responsable, el Instituto de Geofísica, así como el Centro de Geociencias y el Centro de Radioastronomía y Astrofísica. Entre las instituciones nacionales se encuentra la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y el propio gobierno del Estado de Michoacán. Entre las instituciones extranjeras que colaboran en el proyecto están el Instituto TIFR (Tata Institute of Fundamental Research) de la India que es otro radiotelescopio de CIP que se encuentra en longitud de $\sim 100^\circ$. Una de las ventajas que tiene el MEXART en comparación con otros radiotelescopios mencionados en el capítulo anterior, es que debido a su ubicación

geográfica en México, no se presenta el problema de ruido ionosférico intenso que ocurre en altas latitudes cuando hay gran actividad solar intensa que modifica las condiciones magnéticas de la ionosfera terrestre.



Figura 3.1 El cuadro rojo en el mapa indica la ubicación del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario, en el municipio de Coeno, Michoacan. 300 Kilómetros al Noroeste de la Ciudad de México.

El proyecto del radiotelescopio consta de las siguientes instalaciones:

- El arreglo de antenas cubre un área física de aproximadamente 150 m de largo y 70 m de ancho (aproximadamente 9500 m²). En ella se encuentran los 4096 elementos dipolares que componen el arreglo (figura 3.2a).
- Un cuarto de control, de aproximadamente 64 m², donde se reciben las señales procedentes de la antena (figura 3.2b).
- Dos laboratorios, uno de instrumentación electrónica y otro de cómputo.
- Un inmueble donde hay dos casas habitación para estudiantes e investigadores, y un conjunto (6) de cubículos.
- Un taller de mantenimiento general (aproximadamente 150 m²).
- Pavimentación del camino de acceso y de la calle principal del pueblo.

- Sistema de registros subterráneos que conducirán los cables de energía eléctrica y señal de la antena (figura 3.2c).
- Estructura de soporte de la antena (figura 3.2d).

El total de área del terreno que abarca el MEXART es de 3.5 hectáreas, donado por la comunidad Felix Ireta, del municipio de Coeneo, Michoacán.



Figura 3.2 Siguiendo el orden de izquierda a derecha a) las dimensiones físicas de la antena o plataforma principal, b) el cuarto de control donde se encuentran los instrumentos receptores, graficadores y fuentes de poder, c) el sistema subterráneo de amplificación que conduce la señal, d) postes que soportan gran parte el peso de la estructura de la antena.

Actualmente se cuenta con los servicios básicos de operación como son; servicio de energía eléctrica, de teléfono, de agua potable, nivelación y limpieza del terreno, además de contar con servicio de Internet vía satélite.

INFRAESTRUCTURA TÉCNICA

El diseño, la construcción y el mantenimiento de todo radiotelescopio requiere de equipo de medición altamente especializado y costoso que no se encuentra fácilmente en México. Durante la construcción del radiotelescopio se adquirió todo el equipo de medición y calibración necesario para la construcción del radiotelescopio final, que entre otros componentes de tipo electrónico, computacional (software, hardware), etc. forma parte de la infraestructura técnica básica del MEXART. El equipo es el siguiente:

- Analizador de redes "HP_8751A" de 5 Hz-500 MHz.
- Voltímetro vectorial "HP-8508A" de 300 kHz -2 GHz.
- Analizador de espectros "HP-8590E" de 9 kHz-12.8 GHz.
- Generador de radiofrecuencia "Rhode-Schwarz" de 9kHz -1 GHz.
- Generador de funciones "HP-33120A" de 5Hz-15MHz.
- Osciloscopio Tektronix "TDS-544A" de 4 canales, 500 MHz.
- Herramienta especializada para ensamblar los receptores y la antena.
- La tarjeta adquisitor de datos RPC-320, una tarjeta con lenguaje de programación RPBASIC-52 (ver apéndice B).

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO DE LA ANTENA EN EL MEXART

El elemento básico del arreglo final es un dipolo de onda completa ($\ell = 2.13$ m) que está construido con alambre de cobre desnudo, calibre 14/AGW. Este alambre se conecta a una línea de transmisión paralela ensamblada con el mismo tipo de material que el dipolo detector (figura 3.3). La separación entre la base de cada dipolo sobre la línea de transmisión es de 2.13 metros y cada línea de transmisión está constituida por 64 dipolos. Para mantener paralelos los conductores de cobre a una distancia de 2.5 cm sobre toda la longitud de la línea de transmisión, es necesario usar aislantes de plástico, distribuidos cada 30 cm.

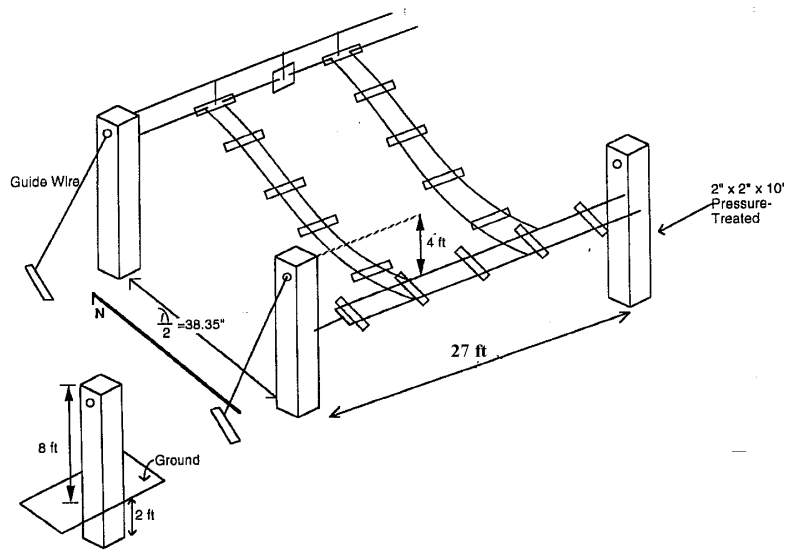


Figura 3.3 Posición y montaje que tienen los dipolos de la línea de transmisión.

Las líneas de transmisión E-O, se dividen en 4 unidades básicas de 16 dipolos cada una, con lo que tenemos 64 líneas de transmisión con 4096 dipolos en total (figura 3.4). Los dipolos en las líneas de transmisión se encuentran orientados horizontalmente en la dirección E-O, la unidad básica tiene una longitud de 34.8 mts. La descripción del recorrido de la señal se muestra más adelante de este capítulo.

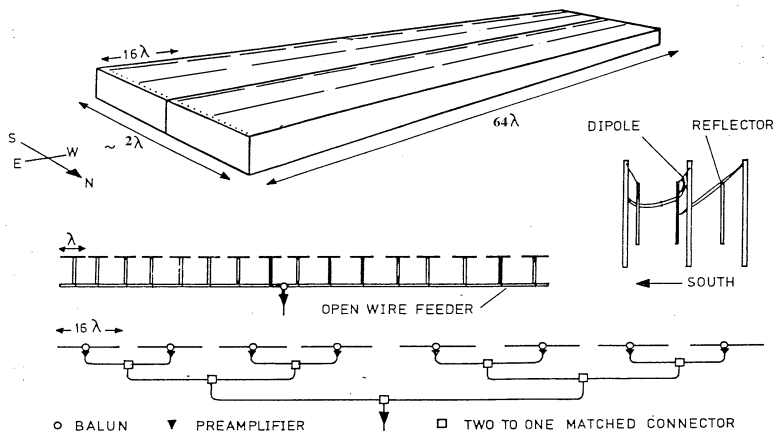


Figura 3.4 Se muestran las dimensiones reales de la antena que conforma al radiotelescopio, se observa la distinción de bloques entre líneas de dipolos y de transmisión. (Tomado de Mexican IPS Test Array[1994]).

La señal captada por cada uno de los 4 bloques de dipolos se conecta directamente a la línea de transmisión abierta de alambres paralelos. Mediante un transformador de impedancias “Balun”, se acopla la señal del sistema de transmisión de alambres paralelos. Este último es el encargado de transportar la señal a las etapas de preamplificación y sistemas combinadores de potencia (2:1). La señal de cada fila es amplificada y enviada a su respectivo receptor (figura 3.5)

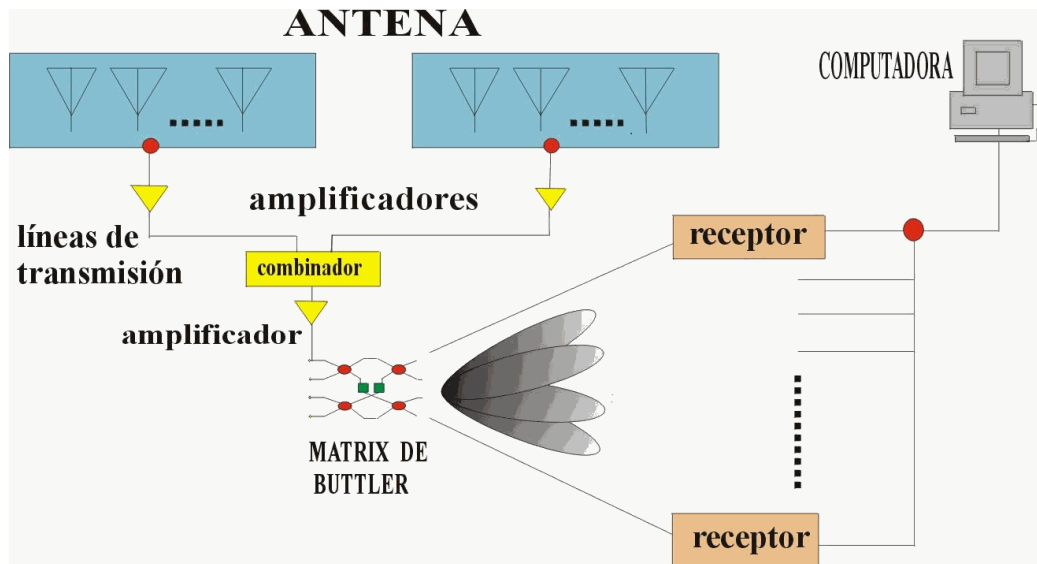


Figura 3.5 Configuración eléctrica de la antena y recorrido de la señal por cada uno de sus bloques.
Tomada de www.soho.igeofcu.unam.mx/radiotelescopio.html

A continuación se describen brevemente, las características físicas y eléctricas de cada bloque que integra la antena. Si el lector desea más información al respecto, consultar la referencia (Carrillo, 1997).

El Balun

Cuando las antenas están alimentadas eléctricamente con cables coaxiales un elemento importante del sistema de recepción de señal es el balun, que es un dispositivo transformador de RF, tiene la función de acoplar las impedancias (oposición de uno o más componentes al paso de corriente alterna) que se tiene en la línea de transmisión bifilar cuya impedancia característica es de 450) (sistema balanceado) a una línea de transmisión coaxial con impedancia de 50c (sistema desbalanceado).

El transformador de impedancias es el medio que permite el acoplamiento de la señal que se tiene en la línea de transmisión (figura 3.6). Un adecuado acoplamiento entre la línea de transmisión y la carga minimiza las pérdidas debido a ondas reflejadas, que se generan al transmitir la señal y acoplarla a los diferentes bloques que recorre la señal hasta el receptor y permite estandarizar todo el sistema de conectores y transmisión a una impedancia característica de $50\ \Omega$. El balun o transformador de acoplamiento de corriente, tiene una razón de acoplamiento (4:1).

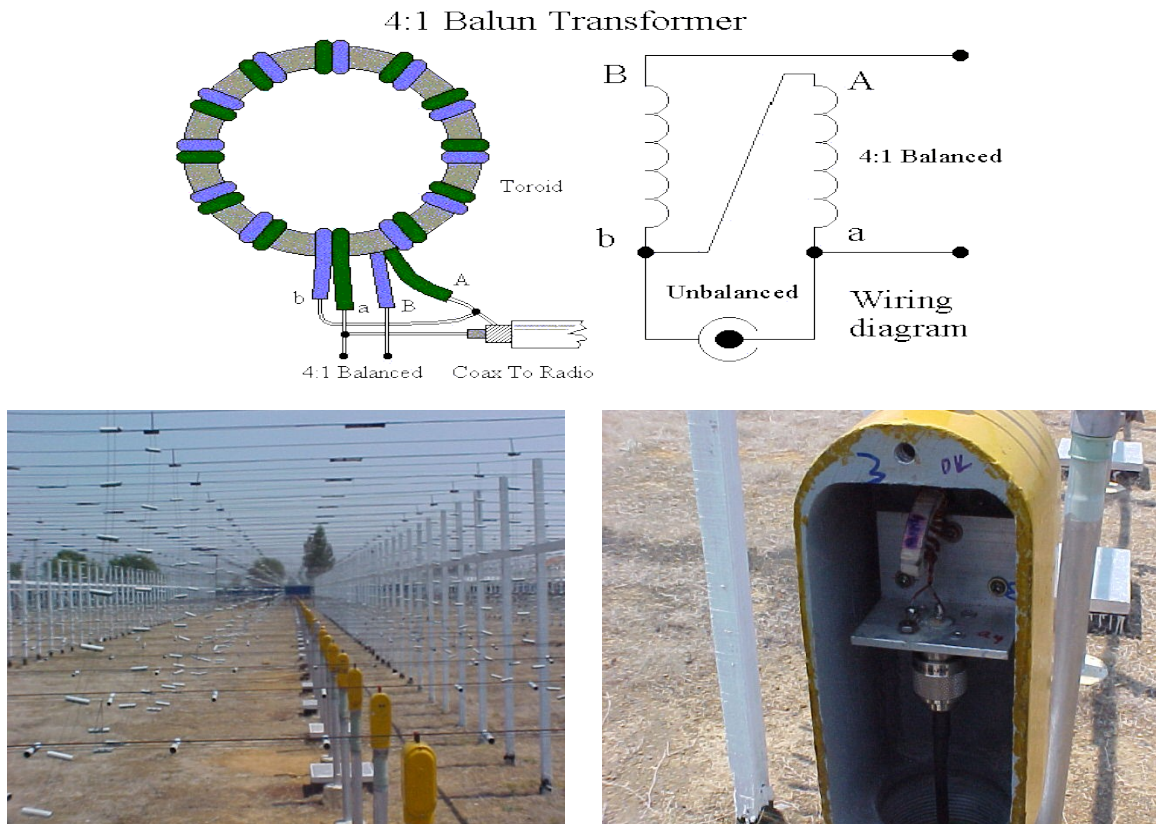


Figura 3.6 En la parte superior de la figura se muestra el diagrama eléctrico de un balun con razón de acoplamiento 4:1. En la parte inferior de la figura se muestra el balun instalado en la plataforma del MEXART, se encuentra 5 cm debajo de las líneas de transmisión, consta de un núcleo de ferrita de geometría toroidal de gran volumen y excelente resistividad, muy alta estabilidad a la temperatura y muy buenas propiedades de protección arriba de los 400 MHz.

Sistema de Preamplificación y combinación.

Debido a que las señales que son captadas por cada bloque de la antena son de intensidad muy débil, es necesario implementar un sistema de amplificación de potencia que proporcione la ganancia adecuada a la señal, para que esta llegue al sistema receptor con la mínima pérdida o atenuación y pueda ser manejada y procesada la señal de interés.

Un amplificador es un dispositivo electrónico de control que tiene como finalidad aumentar el nivel de señal, incrementado para ello la amplitud de la señal de entrada mediante corrientes de polarización (voltaje negativo, voltaje positivo) en el transistor de salida (figura 3.7). En el radiotelescopio la configuración de amplificadores por bloque está basado en la forma tipo árbol con el propósito de aumentar la ganancia (dB) en la señal, rumbo al segundo sistema amplificador ubicado en la parte central de la plataforma de la antena.

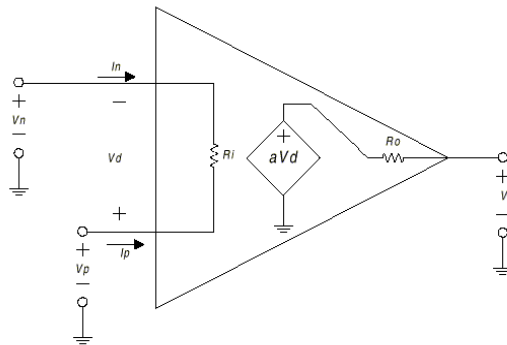


Figura 3.7 Amplificador ideal. Dispositivo de acoplo directo con entrada diferencial y una terminal de salida, donde $V_o = aV_d$ (tensión offset de entrada), a =ganancia de tensión, R_i =resistencia de entrada, R_o =resistencia de salida.

Dentro del sistema de preamplificación también tenemos un transformador divisor de potencia en las entradas de los amplificadores, el transformador divide en partes iguales la potencia de la etapa de excitación de la carga, también es un transformador de línea de transmisión como el combinador de salida. Las siguientes etapas de amplificación se combinan para una mayor potencia de señal rumbo al cuarto de control. La figura 3.8 (izquierda) muestra el diagrama eléctrico donde están el combinador de potencia con dos amplificadores donde las señales se suman en fase y la potencia combinada aparece a través de la carga, y se muestra el arreglo real (derecha) de un sistema de preamplificación donde convergen las llegadas de los cables coaxiales, con la señal de un bloque de 16 antenas cada cable, ya acopladas las impedancias por el balun hacia los amplificadores.

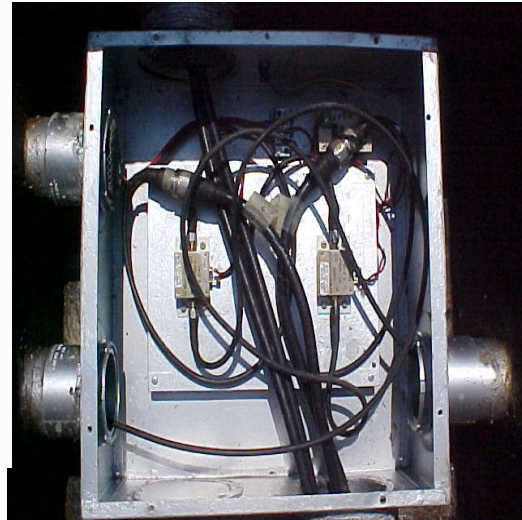
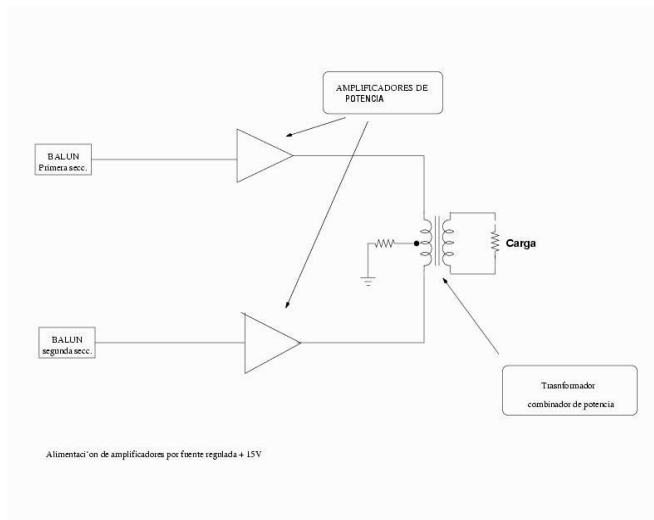


Figura 3.8 Izquierda: Diagrama eléctrico para la obtención de alta potencia de salida con amplificadores y un transformador combinador de potencia. Derecha: Imagen real del sistema de preamplificación y combinación de primer nivel de señal en el MEXART, se encuentra 25 cm por debajo de la superficie de la antena. Hay 5 módulos por cada línea de transmisión.

El número total de preamplificadores del arreglo es, hasta el momento de la realización de este trabajo de 60, cinco por cada línea, de los cuales cuatro de ellos conforman lo que llamamos primer nivel de amplificación o preamplificación. El quinto amplificador definido como segundo nivel es el encargado de amplificar la señal total y enviarla al puerto de entrada de su respectivo receptor.

La primer etapa amplifica la señal que sale del balun hacia el primer nivel de los combinadores de potencia 2:1 entre cada dos unidades básicas o bloques. El segundo nivel de amplificación se establece en la salida del segundo nivel de combinadores de potencia 2:1, en la línea de transmisión antes de enviar la señal hacia los receptores en el laboratorio, vía un cable coaxial.

La suma de cada bloque contribuye con su señal adquirida para generar un patrón de radiación único por cada línea, esto es, la sección 1 se suma con la sección 2, la sección 3 se suma con la sección 4, y la señal resultante de cada par se suma en una segunda etapa. Las características de cada sección de 16 dipolos es idéntica; la variación se obtiene sumando la señal de cada sección. Las cuatro secciones se suman en configuración tipo árbol.

El combinador o divisor de potencia es un dispositivo pasivo que realiza la suma de dos o más señales de frecuencia y fase igual ó diferente, y entrega la suma vectorial de ambas señales a través de su puerto de salida. El arreglo cuenta con 36 combinadores, 3 por cada fila. La señal que se obtiene por fila corresponde a la suma total de los 64 dipolos. Esta señal es enviada a un segundo nivel de preamplificación, para compensar las pérdidas por acoplamiento y transmisión a través de los cables coaxiales hasta el receptor.

La tabla 3.1 muestra las mediciones de los amplificadores hechas el 8 de Junio de 2006, se ven los valores obtenidos en Volt en las líneas 7, 9 y 11. Son resultados obtenidos a la salida del receptor 1 (de 2 receptores con que se contaba en ese año) a una frecuencia central de 140 MHz. Desafortunadamente no se cuenta con los datos de las mismas líneas en el periodo 1 al 30 de Enero de 2005. Cabe mencionar que una rama esta compuesta por dos secciones de la antena (16 elementos + 16 elementos), orientadas E-W.

	S1	S2	E	E + W	W	S3	S4
L 7	1.1	1.15	2.1	4.1	2.1	1.15	1.1
L 9	1.2	1.2	2.3	4.2	1.9	1.1	1.1
L 11	0	1.05	1.05	2.5	1.5	0.55	1.0

Tabla 3.1 Resumen de las mediciones realizadas a las secciones, ramas y líneas 7, 9,11. Los valores que aparecen están dados en Voltios. El valor promedio obtenido para las secciones se calculo en 1.05 Voltios.

Se utilizó una atenuación en RF de 3 dB. (Cortesía Ing. Ernesto A. Mascote).

La discusión de los valores y gráficos de los bloques amplificadores de primer y segundo nivel se realizará en la sección 3.4. Es importante señalar que por estar situados en el subsuelo de la plataforma dichos bloques han padecido desde su instalación y hasta por lo menos el año 2006, de los fenómenos climatológicos el más importante la lluvia (Julio – Noviembre) que en cada año sufren inundaciones las cajas o cavidades donde están contenidos los circuitos electrónicos, también es importante mencionar esto porque dichos fenómenos interrumpen las observaciones que por cuestiones de previsión y seguridad son detenidas hasta por varios días. En los datos de las observaciones presentados en este trabajo hubo periodos (horas) en que se interrumpió la adquisición de señal y no se concluyeron las series de tiempo previstas en la observación (sección 4.1).

El receptor

La propagación es el estudio de los factores de la naturaleza que participan en la difusión de las ondas de radio, las señales de fuentes estelares que llegan a la tierra son débiles y difíciles de recibir en el espectro de radio, si agregamos dificultades como el ruido radiogaláctico que es cierta cantidad de energía solar provocada por oscilaciones arbitrarias de los electrones ó también producido por algunas constelaciones estelares, así como el

ruido generado por la propia antena en sus componentes electrónicos (ruido eléctrico) que se define como cualquier energía eléctrica no deseada presente en un circuito eléctrico. El ruido tiene influencia en la calidad de recepción, por tal motivo es importante identificarlo, cuantificarlo para la mejora en las observaciones que hagamos. Un componente importante dentro de la estructura de bloques para la adquisición de la señal es el receptor.

La función del receptor que se emplea en el MEXART es la misma que tienen todos aquellos receptores que se utilizan en radioastronomía, son el conjunto de elementos electrónicos que procesan la señal hasta que este lista a saber, detectar, medir y procesar las emisiones de fuentes de radio cósmicas que están siendo captadas por la antena para poderlas graficar, calibrar y digitalizar. Debido a que la señal que se recibe es muy débil, uno de los principales requisitos del receptor es que tenga alta sensibilidad (es decir, que sea capaz de registrar señales débiles), y que tenga gran estabilidad (para preservar la fase de las ondas que están llegando).

En muchos casos esta emisión de radio consiste de radiación incoherente cuyas propiedades estadísticas son idénticas al ruido que se genera en el propio receptor o, en su caso, a la radiación de fondo acoplada al receptor por la antena. El tipo de receptor que se utiliza en el radiotelescopio es un superheterodino tipo DICKE (figura 3.9), el nombre de superheterodino se debe al hecho de combinar o multiplicar la señal original con una frecuencia V_{RF} con una señal proveniente del oscilador local a una frecuencia V_o . (cercana en el caso del radiotelescopio a 139 MHz).

Un diagrama de un receptor también se muestra en la figura 3.9, donde $v_{FI} = |v_o - v_{RF}|$, es decir la frecuencia intermedia, v_{FI} , es tal que es ya sea la suma o diferencia entre la frecuencia original v_{RF} y la frecuencia del oscilador local v_o . La combinación/multiplicación de las señales trae consigo que las señales resultantes tengan una frecuencia tal que sea la suma ($v_o + v_{RF}$) ó la diferencia ($|v_o - v_{RF}|$), donde el valor absoluto indica que puede ser v_o mayor o menor que v_{RF} procurando una frecuencia positiva.

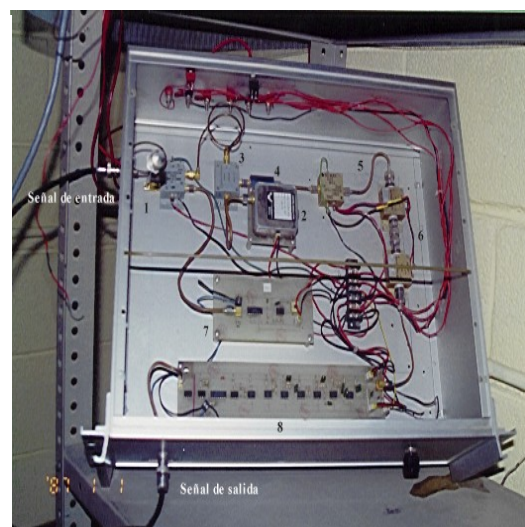
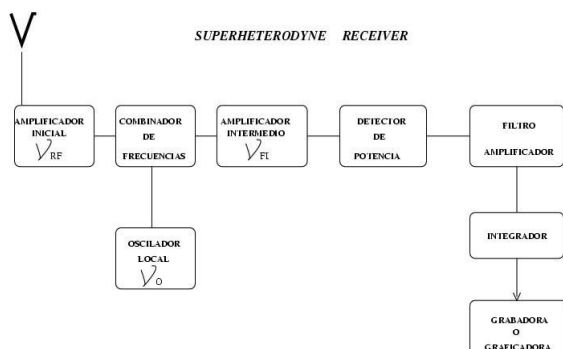


Figura 3.9 Derecha: diagrama en bloques de un radio receptor conocido como superheterodino. Izquierda: Receptor superheterodino tipo Dicke empleado en el radiotelescopio, se encuentra instalado en el cuarto de control.

El receptor utiliza la traslación de frecuencia para poder recibir la señal de frecuencia deseada, es decir, la traslada a un valor de frecuencia constante normalizada llamada frecuencia intermedia (FI), dicha traslación de frecuencia de puede hacer de dos formas:

1. Multiplicación y
2. Mezclado.

En el primer caso a la señal de una frecuencia determinada se le multiplica por un número entero a partir por una FI, para obtener una frecuencia múltiplo de ésta ya sea por: 2, 4, 8, 10, 12, etc. En el segundo caso, el proceso es conocido también como heterodinaje. Se utiliza un circuito o etapa llamada mezcladora. El mezclador presenta dos etapas de entrada y una de salida en las terminales de entrada se ingresa con dos señales de distinta frecuencia, estas se mezclan y en la salida se tiene una frecuencia cuyo valor es la suma o diferencia de las dos señales de entrada.

La etapa de multiplicador de frecuencia, efectúa la operación matemática de multiplicar la frecuencia por un múltiplo entero: 2,3,4, etc. No se multiplica como en el caso del mezclador, en este caso se aprovechan los armónicos que están presentes en una onda senoidal, por más perfecta que esta sea, siempre presenta algo de distorsión lo que significa que están presentes dichos armónicos. Además a la señal se le aplica a un amplificador que debido a su alinealidad le introduce una cantidad de distorsión provocando un aumento de la intensidad y del contenido armónico, después se coloca un filtro que permite seleccionar el armónico deseado. Si se selecciona el primero significa multiplicar por dos, si seleccionamos el segundo se multiplica por tres, etc.

La sensibilidad es la capacidad para percibir o captar una señal de pequeña amplitud de entrada. En el receptor cuanto más ganancia presente esta etapa, tanto más pequeña será la señal de entrada aceptada. O de otra manera cuanto más ganancia presente el mezclador, mayor será la sensibilidad que presente el receptor. La forma de tener una máxima sensibilidad es no adicionarle ruido o la menor cantidad posible, para ello se necesitan transistores en la etapa de entrada con la menos cifra de ruido como por ejemplo el MOSET de doble compuerta (**Carrillo, 1997**).

Cada receptor en el radiotelescopio recibe la señal que se genera en una línea de transmisión independientemente de las demás, lo que se hace de manera manual para de

allí conectarla al graficador analógico o digital. Hasta que se concluya la construcción de la matriz de Butler quien llevará a cabo el proceso completo de manejar las señales de las diferentes antenas para generar los lóbulos interferométricos.

Al momento de escribir, sólo se lleva a cabo la detección mediante 10 líneas de manera individual, con el fin de calibrar cada una de ellas, mientras se construyen los receptores. Esto nos lleva a que en la actualidad se trabaja con sólo 2 receptores de un solo canal, por lo que no se instala todavía la matriz de Butler.

Cabe aclarar que los datos adquiridos y presentados en este trabajo sobre las fuentes de radio, se realizaron con el receptor superheterodino que se utilizaba en el prototipo del MEXART, en Teoloyucan, Estado de México, sólo se les corrigieron en ese entonces detalles como el sistema de IF y la tarjeta de vídeo. Posteriormente se trabajo con un receptor superheterodino al cual se le han hecho modificaciones como en las secciones de baja frecuencia, de vídeo e incorporado secciones de filtro de pasa banda y pasa altas en la parte trasera del instrumento, así como también se ha suprimido la parte de switcheo que incorporaba el receptor de Teoloyucan.

3.3 PARÁMETROS DE OBSERVACIÓN DEL MEXART

En esta sección se hará referencia a explicar cómo es que el Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Michoacán (MEXART) detecta fuentes, comenzando por la descripción de sus componentes y el orden que conjuntan los bloques de antenas estructurados en el radiotelescopio, así también los patrones de radiación formados por dichos bloques (16 antenas y 64 antenas).

En el radiotelescopio el tipo de antena que se utiliza es un arreglo de dipolos cuyo elemento básico es un dipolo plano de $\lambda = 2.13$ m. Este arreglo consta, como ya se mencionó, de 4096 antenas, ya que entre mayor es el número de elementos más área eléctrica se puede cubrir, lo que nos da como resultado una mayor sensibilidad y mayor resolución angular si el arreglo está bien calibrado en su conjunto.

El dipolo básico que se maneja consta de 2 conductores separados por una distancia de 5 cm. Si una corriente circula por un conductor, creará un campo eléctrico y magnético en sus alrededores. En este caso, la corriente creará en cada conductor un campo eléctrico y magnético. Si la distancia entre los dos conductores que forman nuestra línea es demasiado pequeña, no se creará una onda que se propaga, puesto que la contribución que presenta uno de los conductores se anula con la que presenta el otro conductor. En caso contrario,

los campos que crean las corrientes ya no se anularán entre sí, sino que se creará un campo eléctrico y magnético que formará una onda que se podrá propagar por el espacio.

El dipolo (figura 3.10) actuará como una antena debido a esa propiedad que tiene para radiar ondas electromagnéticas al espacio libre. Entonces, así como puede realizar la función de una antena, también puede mostrar las características de una línea de transmisión, cuyos extremos están abiertos.

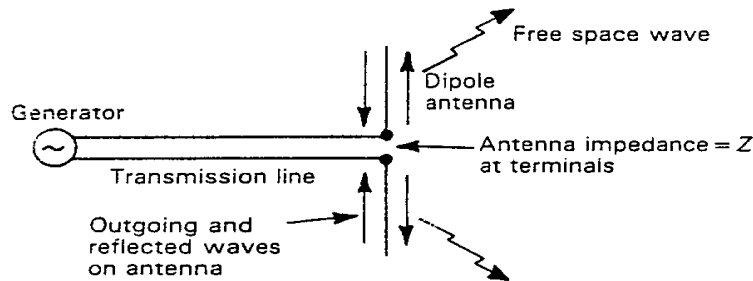


Figura 3.10 Dipolo plano lanzando ondas electromagnéticas al espacio libre (Tomado de Kraus, 1966).

Una antena produce un patrón con propiedades de radiación limitadas, sin embargo utilizando un conjunto de antenas excitadas apropiadamente, es decir, un arreglo es posible obtener características de radiación según los requerimientos dados. Dichas características de radiación son manejadas a través de la selección adecuada del elemento (dipolo), la ubicación de cada uno de estos, y de la distribución y amplitud y fase de excitación de los mismos. El arreglo en el radiotelescopio es lineal (broadside), que consiste en un conjunto de antenas acomodadas sobre una línea recta, y debido a la geometría del arreglo, el campo radiado es dependiente sólo de la coordenada θ e independiente de ϕ (figura 3.11), es decir, es el patrón angular que una antena tendrá cuando emita o reciba señal, este patrón es una medida de la respuesta angular de la antena a la radiación incidente (García, 2001).

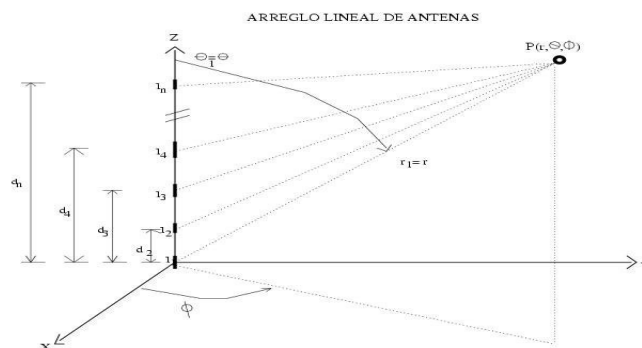


Figura 3.11 Arreglo lineal de N antenas o radiadores conocido como broadside, el campo radiado es dependiente solo de la coordenada θ (independiente de n). Tomada de J. L. Ramos, et. al. "Síntesis de patrones de radiación por medio de arreglos lineales de antenas", México, 2004.

El MEXART puede funcionar como un arreglo de fase, es un grupo de antenas que cuando se conectan, funcionan como una sola antena cuyo ancho de haz y dirección o patrón de radiación (figura 3.12) puede cambiarse electrónicamente sin tener que mover físicamente ninguna de las antenas. El término "conectados o conectan", mencionado al inicio de este párrafo, hace referencia al hecho de que todas las antenas multiplican su señal de referencia por una mandada por un solo oscilador local que se encuentra en el receptor.

La ventaja principal de las antenas de arreglo de fase es que eliminan la necesidad de girar en forma mecánica los elementos de la antena. En esencia, la idea es que el MEXART tenga un patrón de radiación que pueda ajustarse o cambiarse electrónicamente para apuntar a una dirección preferencial del cielo, esto se logrará con la matriz de Butler, dispositivo pasivo eléctrico que, que podrá direccionar el lóbulo generado en la antena independientemente de las demás, de esto se hace referencia más adelante en este capítulo. La aplicación principal de arreglo de fase es en radares, donde los patrones de radiación deben ser capaces de cambiar rápidamente para seguir un objeto en movimiento.

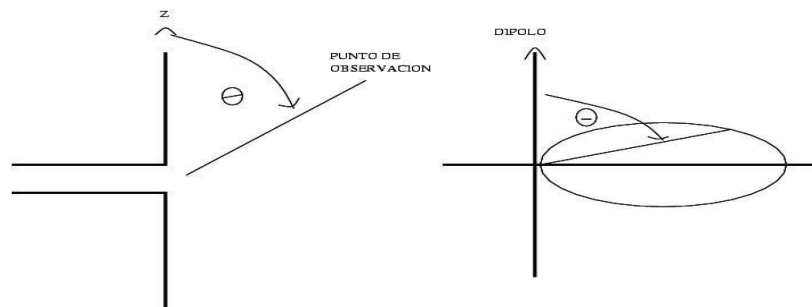


Figura 3.12 Patrón de radiación horizontal de un dipolo de media onda aislado, es decir, no hay presencia eléctrica de otros elementos. Si $D=i$, la antena se denomina en inglés HALF WAVE ANTENNA. (tomada de "Introducción a Radioastronomía (notas)". José A. García, Instituto de Astronomía, UNAM, México, 2001).

Los patrones de radiación en los planos del campo eléctrico y magnético, sirven para determinar el ancho del lóbulo a potencia media, donde se mide el ángulo entre los puntos donde se determina la mitad de potencia máxima radiada. Los patrones de radiación de las

antenas son usualmente medidos en el campo lejano, tal que el HPBW, que es el ancho del lóbulo principal a potencia media (medido en grados), y las otras características de los patrones no varíen con la distancia al radiador (figura 3.13).

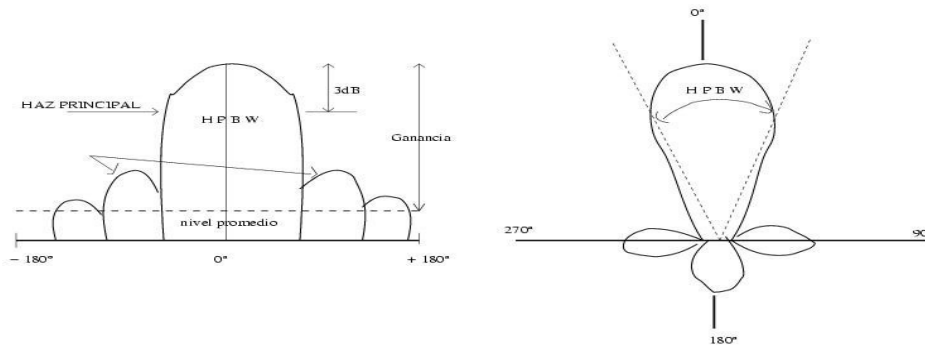


Figura 3.13 Izquierda: patrón de radiación en coordenadas rectangulares de un dipolo, se muestra el ancho del lóbulo, nivel de señal, lóbulos secundarios, ganancia (dB). Derecha: Patrón de radiación de un dipolo en coordenadas direccionales, se muestra el ancho del lóbulo, lóbulos secundarios.

Las características técnicas de operación y configuración del arreglo dipolar de gran área en el MEXART se muestran en la tabla 3.2 siguiente:

Tabla 3.2

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Frecuencia de Operación	139.65	MHz
Longitud de Onda	2.13	Metros
Elemento Básico	Dipolo de onda completa	
Número de elementos	4096	Dipolos
Número de Líneas	64	Líneas
Número de Receptores	64	Tipo Dicke
Ancho de Banda	1.5	MHz
Área Física del Arreglo	10,000m ²	m ²

El arreglo total se integra con 4096 dipolos polarizados colinealmente en la dirección Este – Oeste a esta alineación se le llama polarización X. La polarización es la dirección del vector campo eléctrico, así cuando hablemos de polarización de la antena en el caso del MEXART la polarización será horizontal, con el fin de optimizar el arreglo (tener la

radiación máxima) es necesario que los campos de factor de arreglo y el de los dipolos estén dirigidos a $\theta = 90^\circ$, cuidando que no exista un máximo en otra dirección, esto se logra cuidando que la separación entre los elementos no sea un múltiplo de la longitud de onda (Balanis, 1982).

64 dipolos diferentes constituyen una línea de transmisión, por lo tanto 64 líneas contienen a todos los dipolos constituyendo un arreglo de 64 X 64. Siguiendo el orden de la orientación de la plataforma, el conjunto de las primeras 16 antenas componen un primer bloque de recepción de señal llamada sección de operación de modo que el segundo bloque está compuesto por las siguientes 16 antenas, allí termina el bloque **Este** de la plataforma, los siguientes dos bloques constituyen el lado **Oeste** de la plataforma.

Sobre la formación de los lóbulos que genera cada bloque, las características principales del patrón de radiación se determinarán numéricamente empleando varias subrutinas del software denominado PCAAD 5.0 (Poza D., 2002), el programa emplea el método de momentos para realizar el cálculo donde se utiliza la frecuencia de operación del radiotelescopio, la distancia de separación entre los dipolos (2.15 m) y polarizados en la dirección Z.

En la figura 3.14 se muestra teóricamente una ilustración de un patrón de radiación de un elemento dipolar orientado en la dirección Norte – Sur geográfica, desafortunadamente el autor de este trabajo no tiene dicho el patrón realizado con el software mencionado por lo que lo trazamos a manera de visualizar como se vería el tránsito de una fuente de radio en esa dirección, pues el arreglo del radiotelescopio en su estado actual es un instrumento de tránsito sin movilidad de los lóbulos por no contar en operación de la matriz de Butler. Los patrones de los arreglos de 16 y 64 dipolos respectivamente (figuras 3.15 y 3.16), si se realizaron con el software.

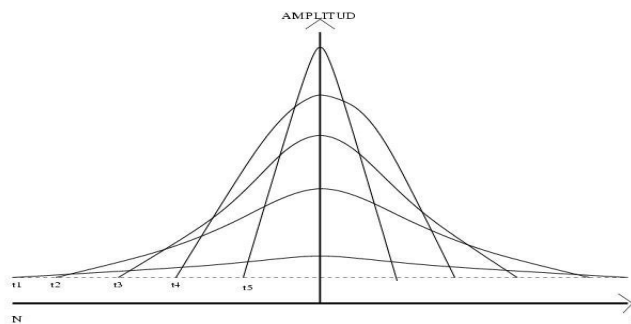


Figura 3.14 Se muestra el patrón de radiación de un dipolo lineal con orientación N-S. En el vertical un estimado de la amplitud sin escala, en el eje horizontal un nivel representativo de ruido y la formación de los lóbulos a diferentes tiempos.

De la figura 3.14 supongamos que en un tiempo t_1 , una fuente se encuentra en el horizonte Norte, en la traza que representa dicho tiempo el nivel de señal empieza a separarse del nivel de ruido, en el tiempo t_2 , suponemos que la fuente se va acercando al cenit del radiotelescopio, en la traza vemos un patrón más definido y superior al nivel de ruido, finalmente en el tiempo t_5 , vemos un ancho del haz más estrecho que los anteriores tiempo se dice entonces que la fuente de radio está en el cenit. A diferencia del transito de la fuente con orientación E-W, el ancho del haz principal será más pequeño y el nivel de amplitud subirá súbitamente cuando la fuente este, pase y traspase el cenit.

La visualización teórica para un arreglo de 16 dipolos con orientación geográfica E-W, utilizando la frecuencia de 140 MHz se muestra en la figura 3.15, los parámetros derivados de la gráfica son: Directividad (el máximo de la intensidad radiada y el promedio de la intensidad) 20 dB, dirección del lóbulo principal 0° , ancho del lóbulo principal a 3dB= 3° , arreglo E-theta.

En un sistema conformado por dispositivos electrónicos como amplificadores, conectores, cableado, etc. constituidos en bloques electrónicos hay factores que contribuyen a las pérdidas o ganancias de señal. En un sistema de baja potencia como en el caso del MEXART, cada dB que se pueda ahorrar o perder es importante. En términos de electrónica un dB (decibel) es la relación entre dos cantidades de potencia eléctrica, la cual es diez veces el logaritmo de la relación. $1 \text{ dB} = 10 \log(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})$.

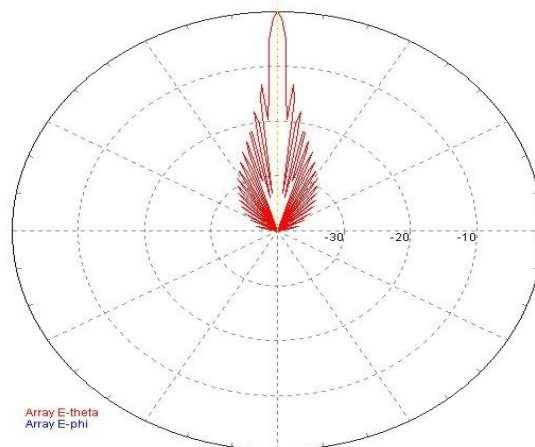


Figura 3.15 Se muestra en el plano polar E-theta el gráfico teórico de un lóbulo generado por un bloque de 16 antenas alineadas colinealmente y polarizadas en el eje X. Los parámetros son: $\lambda = 1.47$ m, frecuencia: 140 MHz. (Cortesía M.C. Armando Carrillo).

La determinación teórica del lóbulo para un arreglo colineal y polarizado a lo largo del eje X de 64 dipolos, utilizando la frecuencia de 140 MHz se muestra en la figura 3.16, los parámetros derivados de la gráfica son: Directividad 26.5° , dirección del lóbulo principal 0° , ancho del lóbulo a 3dB = 0.3° , arreglo E-theta. Las cuatro secciones de una línea de transmisión se suman en configuración tipo árbol, es decir, la sección 1 se suma con la 2, la sección 3 se suma con la 4, y la señal resultante se suma en una segunda etapa de amplificación que viaja hacia el receptor, hasta llegar a tener una representación gráfica de las 4 secciones.

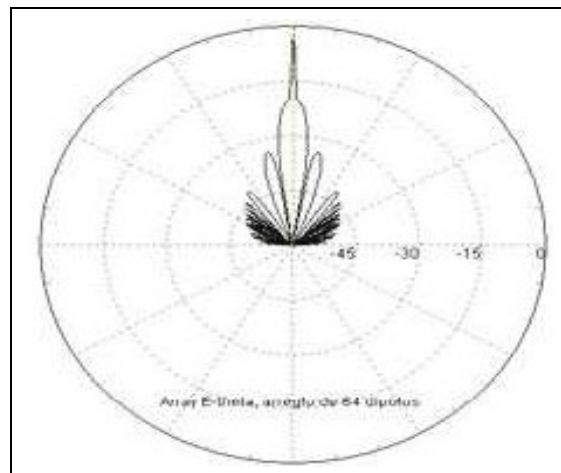


Figura 3.16 Se muestra en el plano polar el gráfico teórico del lóbulo un arreglo de 64 antenas alineadas colinealmente y polarizadas en el eje X, utilizando una frecuencia de 140 MHz. (Cortesía M.C. Armando Carrillo).

Sobre la directividad de los lóbulos en la antena, es decir la radiación que recibe o transmite en una dirección comparada con la que transmitiría una antena isotrópica (que irradia en todas direcciones) estos serán controlados cuando este terminada y operando la matriz de butler (por lo que el arreglo no se puede aún mover en ángulo sobre el horizonte).

La matriz de Butler es un dispositivo formado por una red sin pérdidas que utiliza acopladores híbridos a 3 dB, los acopladores híbridos (figura 3.17) son dispositivos pasivos de cuatro puertos usados como divisores o combinadores de potencia, los cuales funcionan como dispositivos combinadores de fase fija, con una impedancia bien caracterizada (la impedancia es la oposición que presenta un componente o componentes al paso de la corriente alterna).

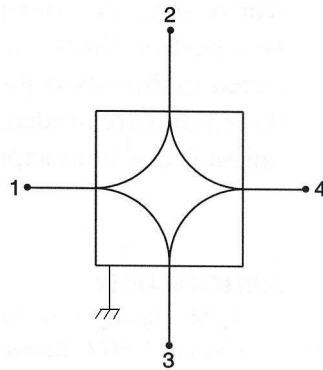


Figura 3.17 Símbolo esquemático para un acoplador híbrido. La potencia de entrada en el puerto 1 se divide en partes iguales a los puertos 2 y 3, siempre que estén terminados apropiadamente no existirá reflexión y la impedancia observada en el puerto 1 será la impedancia característica. En este caso no habrá potencia en el puerto 4. (Cortesía M. C. Armando Carrillo)

Otro dispositivo importante de la matriz de Butler es llamado conmutador de fase o faseador. Dicho dispositivo se compone principalmente de ferrita y es pequeño lo que hace su funcionalidad más eficiente. Su función es la de realizar cambios de fase rápidos. Un cambio de fase se puede realizar modificando uno de los parámetros siguientes: frecuencia, longitud en la línea, velocidad de propagación, permeabilidad o constante dieléctrica (la variación de la rapidez de propagación modificando la permeabilidad, es el principio básico de faseadores). Dentro de la selección de estos dispositivos se consideran requerimientos de señales de control con poca potencia así como manejar potencia alta, ligeros y de un costo razonable (Carrillo, 2007).

La matriz de Butler se caracteriza por estar constituida de N puertos de entrada e igual número de puertos de salida, un arreglo de 2^p por 2^q elementos, donde p y q son enteros, requiere de $2^p + 2^q$ redes de Butler para alcanzar 2^{p+q} elementos. La Figura 3.18 ilustra el circuito básico de un arreglo con ocho elementos que genera 8 haces independientes de modo simultáneo. Este utiliza 12 acopladores direccionales y 8 conmutadores de fase fijos los cuales utilizan valores diferentes en voltajes.

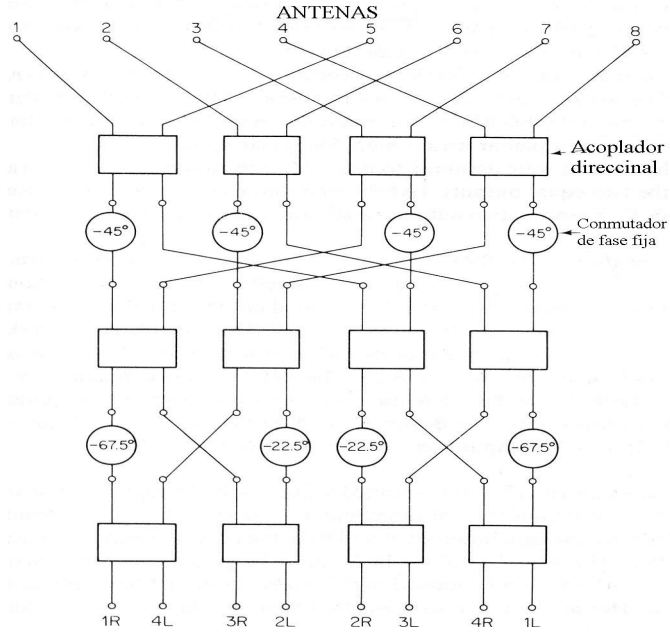


Figura 3.18 Esquema básico para una Matriz de Butler para 8 lóbulos, usando ocho conmutadores de fase fija y doce acopladores direccionales (Cortesía M.C. Armando Carrillo)

El Diseño de una matriz de Butler de 16 puertos próxima a usarse en el MEXART se diseñó en el *National Center For Radio Astrophysic, India*. La matriz de Butler que se pretende construir para el radiotelescopio cuando estén operando las 64 líneas de transmisión es de 32 puertos, cuya función principal es generar 64 *lóbulos detectores* direccionados en 64 declinaciones diferentes y fijas para realizar observaciones del cielo. Los resultados de las observaciones presentados en este trabajo se realizaron sin la matriz de Butler, por no estar ésta terminada, lo que significa que el lóbulo principal generado por cada una de las antenas es fijo y apuntando hacia el cenit.

Una vez descritos los papeles que juegan los dispositivos que conducen la señal desde su recepción en las antenas hasta su registro digital, veremos entre otros aspectos en la siguiente sección la respuesta electromagnética de estos dispositivos con respecto a la observación de radiofuentes como *Cassiopea, Nebulosa del Cangrejo, Cygnus A, Virgo A* y *el sol*.

3.4 DESCRIPCIÓN DE LA RESPUESTA ELECTROMAGNÉTICA DEL ARREGLO DE DIPOLOS A LA RECEPCIÓN DE RADIACIÓN DE OBJETOS CELESTES.

Para detectar radiación proveniente de objetos celestes se necesitan instrumentos que tengan ciertas características como como ser capaces de recibir ondas planas de cierta

región del espacio, que sean capaces de recibir ondas en diferente frecuencia ó longitud de onda y polarización, capaces de distinguir la debil emisión de estos objetos y por último que sean capaces de convertir el volatje a potencia.

Para satisfacer lo anterior es importante saber que el sistema de amplificación se encuentra libre de interferencias electromagnéticas internas y externas (ruido que se suma a la señal). Las interfencias externas se consideran ruido no deseado en la señal portadora antes de llegar al receptor y que está presente en el ambiente radioeléctrico alrededor del observatorio, ejemplo de ello son las radiodiforas comerciales que transmiten en frecuencias cercanas a las del radiotelescopio, también lo son el ruido electromagnético generado por la actividad humana industrial, etc. El ruido interno se considera el producido por los propios dispositivos pasivos electronicos como baluns, amplificadores y el receptor.

Por lo anterior es necesario realizar pruebas de calibración de dichas líneas, observado con cada una de ellas de manera individual por períodos cortos de tiempo (minutos), hasta horas e incluso un día completo. Esto con el fin de caracterizar y cuantificar las respuesta en amplitud y potencia de cada una de ellas por secciones, por ramas (E-W) y por línea completa.

Se presentan a menera de referencia resultados obtenidos con las líneas 1 a 16, realizadas el 18 de Octubre de 2006 por los Ing. Ernesto A. Mascote (Instituto de Geofísica UNAM, Pablo Sierra (CIMAT, Cuba). Cabe señalar que los resultados de las calibraciones del período 1 a 30 de Enero de 2005 no se encontraron en la bitácora del MEXART, como trabajos de calibración a las líneas 7, 9 y 11.

Las pruebas de calibración se realizaron de dos diferentes maneras (la alimentación regulada de cada registro fue de 15 V CD):

1. Se conectaron toda la red de dipolos a los baluns en las líneas 1 a 16, el receptor estuvo trabajando a una frecuencia central de operación de 140 MHz. Esto con el fin de registrar el nivel promedio de ruido en las secciones de las antenas de interes (figura 3.19).
2. Se desconecta toda la red de dipolos de los baluns correspondientes en las líneas 1 a 16 en cada una de ellas. En los bornes del balun se conecto una carga de 50 Ω en lugar de la sección correspondiente de la antenna. Se adicionó un filtro de radio frecuencia RF pasa-alta intercalado entre el balun y el primer amplificador con el fin de aminorar las interferencias presentes en la banda baja del espectro

(frecuencias inferiores a 140 MHz). Esto con el fin de registrar el ruido interno del sistema (figura 3.20).

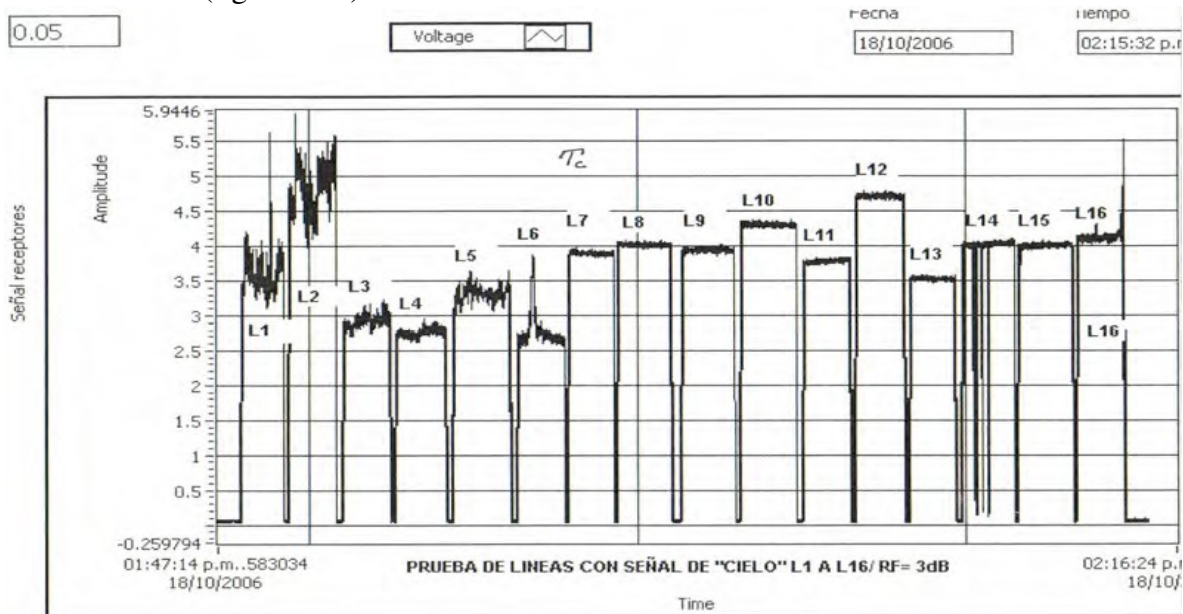


Figura 3.19 Se muestra el nivel de señal ó amplitud (Volt) de las antenas 1 a 16 trabajando a una frecuencia de 140 MHz, conectadas a los baluns. (Tomada de Sierra P., 2006).

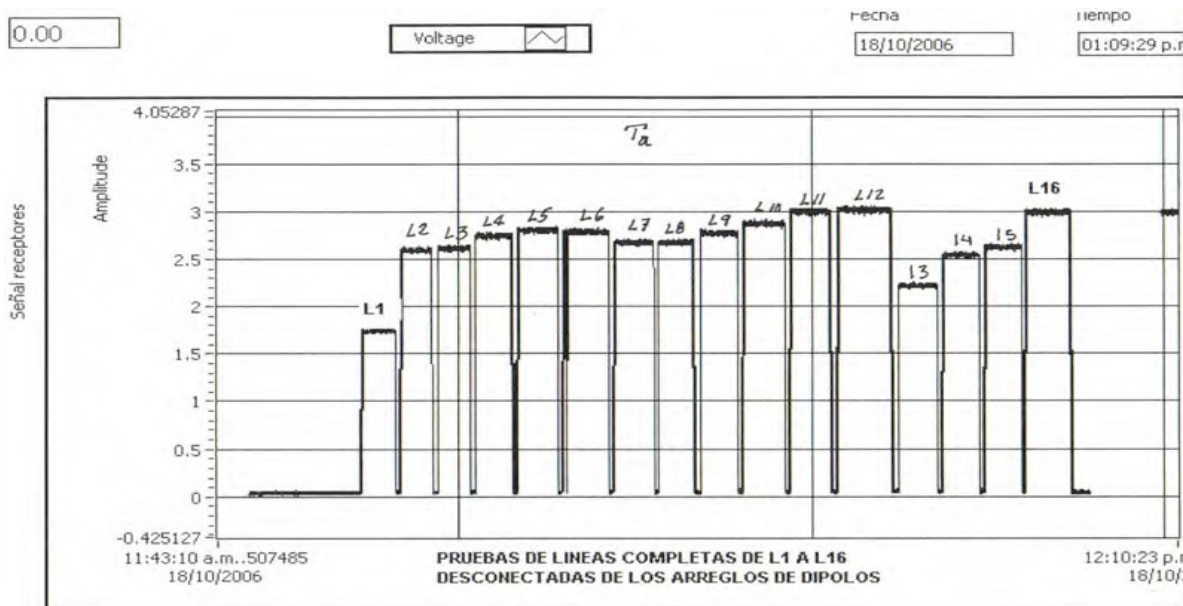


Figura 3.20 Se muestra el nivel de señal ó amplitud (volt) de los sistemas de amplificación en las antenas 1 a 16 trabajando a una frecuencia de 140 MHz. Se desconectaron las antenas de los baluns en los bornes y en su lugar se conecto una carga de 50 Ω. (Tomada de Sierra P., 2006).

De la figura 3.19 podemos apreciar un significativo desvalance en las seis primeras líneas en general, como antecedente a nuestras calibraciones en las líneas 7, 9 y 11, no se

consideraron estas seis primeras líneas por estar deshabilitadas por reparaciones en los sistemas de calibración que habían sufrido inundaciones en sus registros y después de ser limpiadas y revisadas en sus cables y amplificadores se registraron manteniendo dicho desvalance. En las líneas 7, 9 y 11 se aprecia un nivel muy alto de amplitud con promedio de 3.9 Volt.

En la figura 3.20 donde se desconectaron los baluns de las líneas de transmisión y en los bornes de los baluns se conectó una carga resistencia de 50 Ω de tal manera que sólo se aprecie el ruido interno del sistema (interferencia eléctrica presente en un dispositivo), se aprecia que el ruido que aparece en la anterior figura disminuye considerablemente a promedios en las líneas 7, 9 y 11 de 2.8 Volt de amplitud. La forma en como se corrigió está descrita en los siguientes puntos (sierra, 2006):

Descripción de la prueba.

1. Línea completa (4 secciones) observando el “cielo”.
2. “Cero” (desconexión del cable maestro de la salida del amplificador de II Nivel)
3. Rama “E” observando “cielo” rama “W” desconectada, con carga de 50 Ohm en entrada del combinador central.
4. Desconectadas salidas de amplificadores en S1 y S2 y en su lugar cargas de 50Ohm.
5. Sección S1 observando el “cielo” y carga de 50 Ohm en lugar de S2 después del amplificador.
6. Se repite (4)
7. Sección S2 observando el “cielo” y carga de 50 Ohm en lugar de S1 después de amplif.
8. Se repite (4).
9. Se repite (5).
10. Sección S1 y S2 observando el “cielo” (Idem 3).
11. Sección S1 observando “cielo” y carga de 50 Ohm en lugar del balun de S2.
12. Carga de 50 Ohm en lugar de balun en S1 y S2.
13. Sección S2 observando “cielo” y carga de 50 Ohm en lugar del balun de S1.
14. Idem (12).
15. Idem (11).
16. Secciones S1 y S2 observando “cielo” (Rama E).
17. S1 observando “cielo” y S2 desconectado en bornes de arreglo de dipolos.
18. Se conecta de nuevo S2 a línea de dipolos (Rama E).
19. S2 observando “cielo” y S1 desconectado en bornes de arreglo de dipolos.
20. Rama “E” observando “cielo”.

21. “Cero” (Idem 2).

Para la rama Oeste se repite el mismo procedimiento.

Para observar fuentes de radio que puedan ser captadas por el MEXART cuyas coordenadas son $19^{\circ} 48'$ Norte, $101^{\circ} 41'$ Oeste, se deben de tener ciertas consideraciones como son:

- Su resolución angular (el ancho del haz a potencia media HPBW), es decir, la capacidad de resolver con detalle estructuras de pequeño tamaño angular. Las antenas tienen la capacidad de recibir información a través de su haz principal, el ancho total a media potencia de este haz también se le conoce como resolución angular de la antena.
- La zona del cielo en donde algunos astros tienen declinaciones al norte $\delta = - 60^{\circ}$. La declinación es la coordenada de la esfera celeste equivalente a la latitud de la tierra.
- La frecuencia de operación del MEXART es 139.65 MHz.
- Dentro de las secciones de amplificación es importante considerar cuando estos trabajan a potencia máxima en continuo que puede soportar el amplificador antes de su deterioro pues si se hace trabajar por encima de la potencia nominal para la que está diseñado se podrá dañar, por tanto dentro de los trabajos de calibración se deben cuidar estos aspectos ya que radiotelescopio cuenta con un gran número de ellos.
- Cuando sumamos la señal de las cuatro secciones que componen una línea de transmisión, cada sección aporta su contribución de señal para obtener un lóbulo principal generado por esta suma, así el patrón de radiación de cada línea queda definido.
- Las características mencionadas al inicio de esta sección las satisficará el receptor, contar con un buen receptor, que consiste de amplificadores que amplifican la señal débil detectada, de combinadores o multiplicadores de potencia que combinan frecuencias locales conocidas con la frecuencia de radiación incidente, selectores de banda los cuales filtran la señal de tal forma de dejar pasar solo las frecuencias deseadas.

La operación del MEXART que la señal que llega de todas líneas E-W, llegue a estas con la misma fase ($\pm 1^{\circ}$) y amplitud (± 1 dB), si consideramos los 64 elementos que conforman una línea con la misma fase y amplitud tenemos las longitudes de 64 a , todas las señales

son sumadas por igual resultando un lóbulo principal de ellas. El lóbulo principal apunta hacia el cenit, el ancho del haz a potencia media (HPBW) a lo largo de E-W es aproximadamente $57^{\circ}/64 = 0.9^{\circ}$ (la resolución del MEXART es de casi un grado) y en la orientación N-S $HPBW > 130^{\circ}$.

La figura 3.19 muestra teóricamente el patron del haz en el plano E-W, considerando los dipolos isotropicos fuera de un acoplamiento mutuó y considerando que el arreglo tiene una pantalla reflectora de $e^{-1/4}$ (la pantalla se ubica a 0.53 m por debajo de los dipolos está manufacturada de alambre de acero inoxidable), resulta un haz principal a 3 dB con ancho del haz de aproximadamente 0.3° con dos lóbulos laterales de aproximadamente 10° del eje principal (González, 2005). Este patron de radiación puede ser un antecedente para medir los transitos de grandes fuentes de radio que pasan cerca de zenith del radiotelescopio a parte del sol.

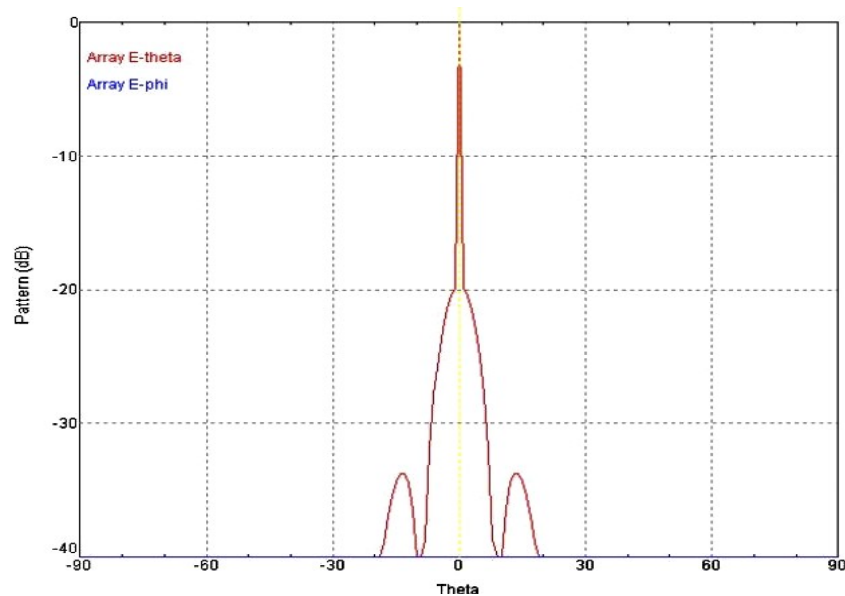


Figura 3.19 Muestra teóricamente en coordenadas rectangulares y escala en dB, el patron de radiación de 64 dipolos polarizados en el plano E-theta. El patron fue obtenido con el programa CAAD 5.0 (Tomado de **“Calibration and testing of the MEXART antenna using solar transits” González et al., 2005**).

En el procedimiento de la búsqueda de información de las fuentes que se presentarán en este trabajo existe un software que corre una base de datos creada sobre fuentes estelares donde los valores de longitud y latitud son fijos, es decir que utiliza un catalogo de fuentes puntuales visibles en el MEXART. Se considera puntuales a las fuentes que tienen tamaños angulares menores a un minuto de arco.

Para buscar las fuentes, se convierte el tiempo sidéreo local a radianes y se busca en la base de datos a las fuentes que estén cerca. Lo “cerca” está determinado por el parámetro radio, que permite dar un intervalo hacia delante y hacia atrás en el tiempo sidéreo local, hacia un lado y hacia el otro en la coordenada de latitud. El origen de la consulta para estas fuentes de radio y otras, se obtuvo el software llamado ASTROFLUX (Mendizábal, 2003), donde está cargada dicha información (figura 3.20).

La forma en que se hace el proceso de búsqueda es la siguiente:

1. Se hace una conexión a la base de datos.
2. Se leen los parámetros que introdujo el usuario esto significa los campos identificador (id), nombre de la fuente (nf), ascensión recta (ar), declinación (dec), flujo, distancia angular (da), el nombre del archivo, y la línea en donde estaba la información.

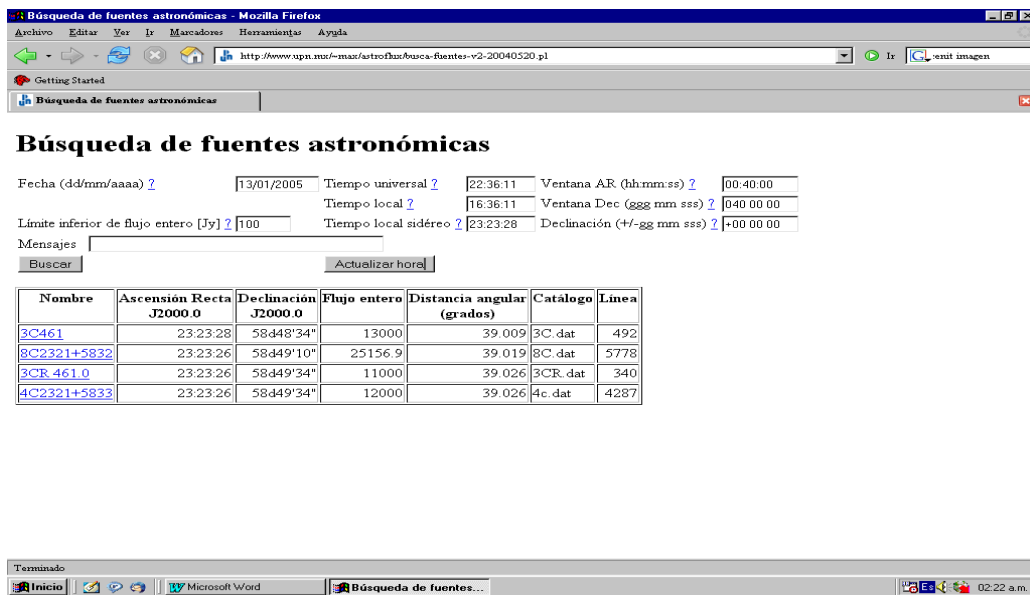


Figura 3.20 Vista de los resultados que presenta el programa astroflux con sus respectivas variables, se muestra como ejemplo la fuente cassiopea 3C461. (tomada <http://www.upn.mx/~max/astroflux/>)

Cabe señalar que la base de datos está en coordenadas Julianas (J2000.0), por lo que fue necesario calcular la precesión entre el año 2000 y el día de hoy. Para calcular la precesión de una fuente cualquiera, se puede usar la siguiente expresión:

$$d_{\alpha} = \alpha_0 + (3.07420 + 1.33589 \sin \alpha_0 \tan \delta_0) \times N \quad (\text{AR})$$

$$d_{\delta} = \delta_0 + (20.0383 \cos \alpha_0) \times N \quad (\text{Dec})$$

En donde N es el número de años transcurridos desde el año 2000. Si se toma, por ejemplo la fuente con $l_0 = 19:07:23$ y $\delta_0 = 19^\circ 55' 46''$, se tiene que, transcurridos 20 años, $l_1 = 19:07:26$ y $\delta_1 = 20^\circ 2' 4.65''$ (**Mendizabal, 2003**), por lo que será necesario incorporar nuevas formulas de precesión en algunos años.

Para definir un rectángulo del cielo en el que se quiera saber cuando transita cierta fuente en la esfera celeste lo “construimos” con las coordenadas de ascensión recta (que equivale a la longitud terrestre) y declinación respectivamente:

$$\alpha_1 = \alpha - \Delta\alpha$$

$$\alpha_2 = \alpha + \Delta\alpha$$

$$\delta_1 = \delta - \Delta\delta$$

$$\delta_2 = \delta + \Delta\delta$$

en donde

$$\Delta\delta = \text{radio}$$

$$\Delta\alpha = \Delta\delta * \cos \delta.$$

Las unidades de medida son, para la ascensión recta (α), horas, minutos, segundos y, para la declinación (δ), grados, minutos y segundos.

En referencia al rectángulo definido en este trabajo se presentaran datos de las fuentes celestes **CASSIOPEA, CYGNUS, VIRGO A, NEBULOSA DEL CANGREJO y EL SOL**, debido a que transitan dicho rectángulo y tienen una densidad de flujo por arriba de los 1000 Jansky (Jy*). Cabe señalar que además de dichas fuentes de radio hay otras fuentes que no se registraron por ser de menor potencia de flujo.

Tabla 3.3 Datos adicionales de las fuentes de estudio.

<i>NOMBRE</i>	<i>CATALOGO DE FUENTE</i>	<i>DENSIDAD DE FLUJO</i>	<i>ASCENSIÓN RECTA</i>	<i>DECLINACIÓN (Hrs: Min: Seg)</i>	<i>DISTANCIA ANGULAR (grados)</i>
Cassiopea	3C461	13000 Jy	23:23:28	58d 48' 34''	39.06°
Cygnus	3C405	8600 Jy	19:59:28	40d 43' 16''	20.92°
Virgo A	3C274	1100 Jy	12:30:50	12d 23' 32''	07.40°
Crab Nebula	3C144	1500 Jy	05:34:32	22d 01' 10''	20.21°
Sol ¹					

2

¹* 1 jy = 10²³ erg/cm² seg hz

2

Para nuestras observaciones dentro del programa tuvimos una ventana de observación de $AR = 00:40:00$ y $Dec = 40^\circ$. Los casilleros vacíos de información del Sol en la tabla 3.3, se deben a que el catalogo de fuentes fue hecho con base en observaciones de fuentes galácticas y extra galácticas, por ellos no aparece información del Sol, además de que el Sol es variable en su flujo a las frecuencias cercanas con que opera el MEXART.

Una vez descritos los parámetros de observación y calibración en el MEXART y localizada la información con base en los argumentos anteriores inicia el procedimiento para la adquisición y el procesamiento de las series de datos adquiridos, que se discutirá en el siguiente capítulo.

CAPITULO 4

PRIMERAS CALIBRACIONES DEL MEXART CON FUENTES ESTELARES

En este capítulo nos ocuparemos de los procedimientos para la adquisición de las series de tiempo de los transitos en las fuentes estelares CASSIOPEA, NEBULOSA DEL CANGREJO, CYGNUS A, VIRGO A Y EL SOL en el Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario, en Coeneo, Michoacán, tomadas de las líneas 7, 9 y 11 en el mes de Enero de 2005 (sección 4.1). Así también los procedimientos realizados para procesar las series de tiempo en formato digital (sección 4.2). Presentamos en forma gráfica los resultados obtenidos de dichas series en orden siguiente:

1. Tránsito en tiempo real de la fuente.
2. Concentración de los tránsitos en un intervalo de 30 minutos.
3. Promedio de las series de tiempo obtenidas de la fuente en el mes de Enero de 2005.
4. Comparación entre el promedio y el tránsito de la fuente por día.

Finalmente se presenta una breve discusión de los resultados al término del capítulo. Cabe señalar que se presentan las primeras calibraciones de las líneas 7, 9 y 11 tomando como referencia las fuentes ya mencionadas, ya que a la recopilación de los datos se encontraban operando dichas líneas. Las líneas 1 a 6, 8, 10 y 12 no estaban operando por problemas de desalineación de los elementos dipolares e inundación en registros donde se encuentran los sistemas amplificadores y por consecuencia estaban en reparación. Hasta la conclusión de este trabajo, no estaba aún terminada la matriz de Butler, componente necesario para trabajar con mayor número de elementos independientes. Por consiguiente la directividad del patrón de radicación que genera cada antena es fija, es decir, que no podemos apuntar a una dirección preferente para “observar” alguna parte del cielo que escojamos o apuntar hacia alguna fuente de radio en específico sino sólo al zenit.

4.1 ADQUISICIÓN DE LAS PRIMERAS CALIBRACIONES DEL MEXART

Las condiciones climatológicas para la adquisición de las observaciones son importantes a considerar. Por cuestiones de seguridad de los subsistemas eléctricos como baluns, amplificadores, combinadores de potencia, receptor, tarjeta adquisitoria de datos y fuentes

de alimentación en su conjunto estaban expuestas a descargas eléctricas producto de tormentas eléctricas de gran magnitud. Así pues los primeros días de Enero de 2005 (1 a 10) no se obtuvieron series de tiempo por condiciones climatológicas no favorables, hubo casos en que las series de tiempo se interrumpieron y no se completaron los intervalos de tiempo previstos para cada fuente de radio.

El MEXART durante las observaciones operó a una frecuencia central de 140 MHz con un ancho de banda de 1.5 MHz, las fuentes de poder que alimentan a cada línea trabajaron a 15 Volt CD. Cabe hacer mención que sólo se podía trabajar con una línea por día pues no se contaba con otras fuentes de poder así por ejemplo el día 12 de Enero de 2005 se trabajó con la antena 7 dejando para observación las otras líneas.

En el recorrido de la señal o respuesta electromagnética que se describió en el capítulo anterior falta una etapa importante, esta etapa es la adquisición de la señal en forma digital que se realiza mediante una tarjeta de adquisición de datos conectada a una Pc. En Julio del año 2004 se detectó por primera vez en el MEXART el SOL. En ese momento se contaba con la tarjeta adquisidora de datos RPC-320 (**figura 4.1**) y una tarjeta con lenguaje de programación RPBASIC-52 (**Casillas, 2004**). Esta tarjeta RPC-320 se utilizó para obtener datos que sirvieron para hacer pruebas preliminares de calibración en la antena del observatorio.

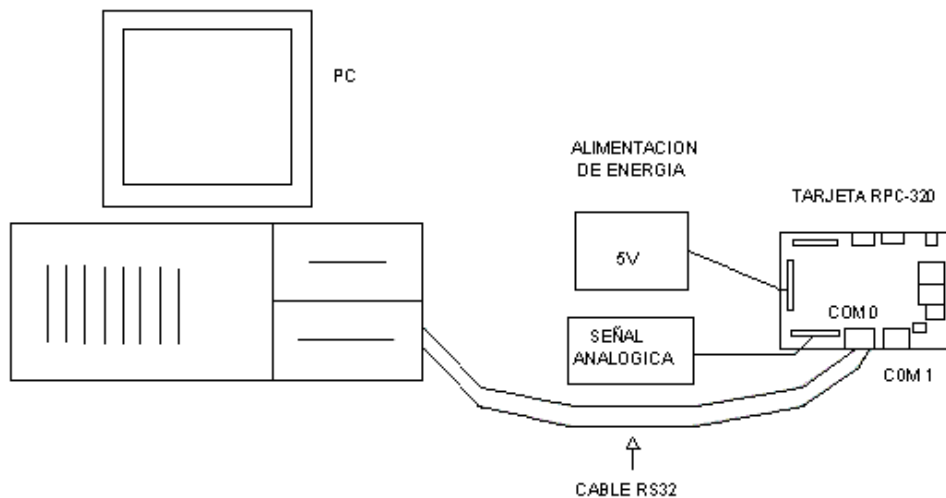


Figura 4.1 Conexión de la tarjeta RPC -320 (Casillas, 2004).

Por flexibilidad, accesibilidad y compatibilidad con el hardware, la tarjeta adquisidora de datos **PCI 8640E de NATIONAL INSTRUMENTS**, trabaja con el software LABVIEW, en el que las variables de adquisición y flujo de datos pueden controlarse con la programación respectiva (**Figura 4.2**). Dentro de la programación tenemos un archivo

digital que es el resultado de la adquisición de las series de tiempo y cuya información, que queda sobre el registro, es la siguiente:

- Un intervalo de tiempo (Δt) de muestreo de 0.1 segundos, es decir, 10 muestras por segundo.
- La fecha y tiempo real de inicio de arranque del archivo en LABVIEW.
- Línea de comentarios donde podemos escribir el número de la antena y receptor utilizados y, si es el caso, algún otro dispositivo que esté como auxiliar para la adquisición.
- La primera columna es el tiempo dado en segundos y la segunda columna es la amplitud de la señal dada en Volts.

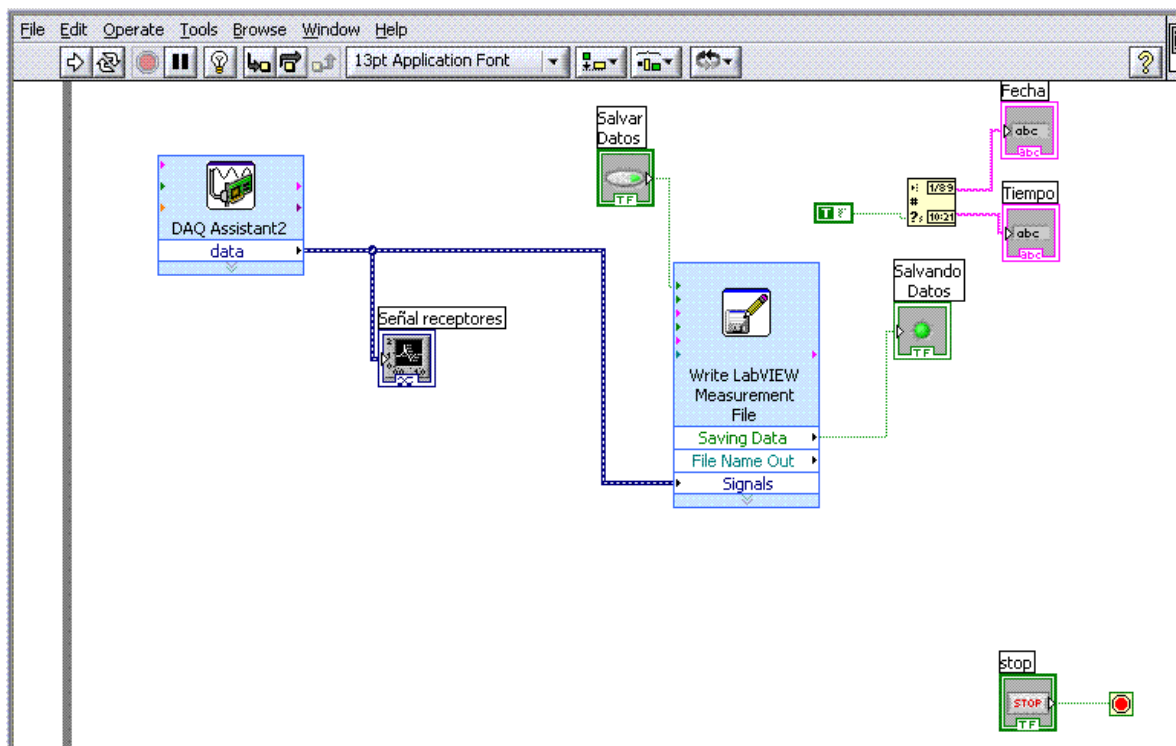


Figura 4.2 Diagrama de flujo programado en LABVIEW, para la adquisición de datos por la tarjeta PCI 8640E National Instruments. (Cortesía de M.C. Armando Carrillo)

En la construcción de nuestra base de datos sobre las series de tiempo, se tomó como criterio para ordenarlos el día y tiempo local en el tránsito de cada fuente. Obtuvimos días completos de observación, pero cabe mencionar que el sistema adquirente de datos en ese periodo de observaciones debió detenerse debido a que las condiciones climatológicas ya mencionadas pues suponían un riesgo para la seguridad del sistema.

Los pasos a seguir para la adquisición de las series de tiempo de las fuentes estelares son:

1. Buscar en la base de datos del programa BUSCA FUENTES, el tiempo de tránsito por el Radiotelescopio de Cennelleo Interplanetario, de las fuentes de radio para cada día del mes de Enero de 2005. Realizar una tabla de observación sobre dichos tiempos. Se anota en una bitácora el número de antena que trabajó en el día en cuestión de observación y el número de receptor, en Enero de 2005 se contaba con dos receptores (reciver 0 y reciver 1) todas las observaciones presentadas en este trabajo se realizaron con el receptor 0, el otro receptor estaba en pruebas de calibración por lo que nó se utilizó.
2. Por lo menos una hora y media antes del tránsito de la fuente a observar, se encienden los instrumentos de poder en el cuarto de control, hacemos referencia por dichos instrumentos a las fuentes de poder que alimentan a los amplificadores, baluns, etc., encendemos también el ordenador y tarjeta adquisitora de datos. Lo anterior con el fin de dar tiempo al sistema a su estabilidad eléctrica de funcionamiento y a la programación de la tarjeta que obtiene la series de tiempo en formato *.lvm. Dicho formato contiene la observación en periodos de 30 minutos que manda al ordenador.
3. En la bitácora de observaciones se anota las incidencias que el observador considere importantes como son irregularidades en los niveles de voltajes en las fuentes de poder, tormenta eléctrica aproximandose con dirección a la antena, interferencias provocadas por instrumentos de radiocomunicación de banda civil cercana a la antena, etc.

Una ventaja de los pasos anteriores es que podemos trabajar en el mantenimiento o conexión de las otras antenas sin interferir en las observaciones, se pueden realizar trabajos de cableado en las otras antenas, limpieza del terreno y cabidades de los sistemas de amplificación. Una vez adquiridas las series de tiempo se procede a procesarlas en diversos formatos digitales a partir del original (*.lvm), dicho procesamiento se discutirá en la siguiente sección.

4.2 PROCESAMIENTO DE LAS PRIMERAS CALIBRACIONES EN EL MEXART

En esta sección describiremos los procedimientos realizados una vez que tenemos el registro digital de las señales correspondientes en las antenas. Como se describió en la anterior sección únicamente se tomaron en cuenta los registros de las antenas 7, 9 y 11 por

ser las que mejor respuesta tuvieron a diversas pruebas de calibración y sus respectivos bloques de amplificación.

Para el análisis de las series de datos obtenidas por el MEXART, se consideró un periodo de observación de 20 días en el mes de Enero de 2005. Dentro de este periodo de observación se elaboró la tabla **tabla 4.1** con información sobre los tránsitos de las cinco fuentes de radio que pudieron ser registradas por el observatorio. La mayoría de las observaciones se llevaron a cabo sin contratiempos.

Cabe mencionar de la tabla 4.1 que en el caso de Virgo A, sólo se obtuvieron 2 series de tiempo los días 14 y 21, los resultados se discutirán más adelante, el motivo fue que las condiciones climatológicas no permitieron obtener más observaciones en la mayoría de los días previstos. Durante el mes de Enero su tránsito fue en el periodo de 05:30 am a 04:30 am tiempo local, se menciona porque se consideraba demasiada humedad y escurrimientos para los sistemas amplificadores y baluns respectivamente. Este problema actualmente se ha solucionado implementando medidas más eficientes en la aplicación de los materiales que protegen a los sistemas (aislantes, impermeabilizantes, emparejamiento del terreno, etc.) para buen funcionamiento.

TABLA DE OBSERVACIONES DE RADIOFUENTES ENERO 2005
MEXART

FECHA	Cassiopea A 3C461 AR= 23:23:28 Flujo: 13000 Jy	Nebulosa del Cangrejo 3C144 AR= 05:34:32 Flujo: 1500 Jy	Cygnus A 3C405 AR= 19:59:28 Flujo: 8600 Jy	Virgo A 3C274 AR= 12:30:50 Flujo: 1100 Jy	SOL	ANTENA
12/01/2005	16:40:07	22:54:06	13:16:28	05:49:16	12:57	7
13/01/2005	16:36:11	22:50:10	13:12:45	05:45:20	12:57	7
14/01/2005	16:32:15	22:46:14	13:08:49	05:41:24	12:58	9
15/01/2005	16:28:19	22:42:18	13:04:53	05:37:28	X	9
16/01/2005	16:24:23	22:38:23	13:00:57	05:33:32	12:58	9
17/01/2005	16:20:27	22:34:27	12:57:01	05:29:36	12:58	9
18/01/2005	16:16:32	22:30:31	12:53:05	05:25:40	12:59	9
19/01/2005	16:12:36	22:26:35	12:49:09	05:21:45	13:00	7
20/01/2005	16:08:40	22:22:39	12:45:13	05:17:49	12:59	7
21/01/2005	16:04:44	22:18:43	12:41:17	05:13:53	12:59	9
22/01/2005	16:00:48	22:14:47	12:37:21	05:09:57	12:59	9
23/01/2005	15:56:52	22:10:51	12:33:25	05:06:01	X	X

24/01/2005	15:52:56	22:06:55	12:29:30	05:02:05	X	X
25/01/2005	15:49:00	22:02:59	12:59:28	04:58:09	X	7 + 9
26/01/2005	15:45:04	21:59:03	12:21:38	04:54:13	13:01	7
27/01/2005	15:41:08	21:55:08	12:17:42	04:50:17	X	7
28/01/2005	15:37:12	21:51:12	12:13:46	04:46:21	13:02	7
29/01/2005	15:33:17	21:47:16	12:09:50	04:42:25	X	X
30/01/2005	15:29:21	21:43:20	12:05:54	04:38:30	13:01	7
31/01/2005	15:25:25	21:39:24	12:01:58	04:34:34	X	7 + 8

Tabla 4.1 Se describe la hora de tránsito, el nombre del catálogo, el flujo y posición de cada una de las fuentes, así como la antena con que fueron registradas en el MEXART. El símbolo X significa que no hubo registro en esa fecha del tránsito de la fuente en cuestión.

Con base en la información recabada en la tabla y una vez obtenidas las series de datos, seleccionamos el archivo donde se encuentra el tránsito de la fuente a visualizar. Para dicho propósito se escogió el programa de software **ORIGIN**, debido a su capacidad de procesamiento y visualización además de rapidez con archivos pequeños. A manera de ejemplificar los procedimientos para el procesamiento de las series de tiempo hasta su visualización llamaremos a nuestro archivo muestra **serie**.*

El archivo de salida que genera la tarjeta adquisitora **serie.lvm** es necesario cambiarlo a formato **serie.txt** (**figura 4.3**) que es más universal para poder manipularlo en las diferentes opciones de software como es el caso de EXCEL, esta opción se puede hacer cuando guardamos el archivo como serie.txt. Una vez que tenemos el archivo serie.txt, “recortamos” el tiempo real que nos interesa de la serie, es decir si el tránsito es de una fuente fue a las 11:30 am, buscamos el intervalo 11:15 – 11:45 am (tiempo real 30 min.), después lo guardamos en formato excel **serie.xls**. Tenemos que hacer dichos trasposos del archivo muestra LABVIEW – NOTEPAD – EXCEL – ORIGIN, porque este último no permite manipular las columnas en formato **serie.txt**.

```

CaT_270105 - Notepad
File Edit Format View Help
Channels 1
Samples 100
Date 27/01/2005
Time 31:21.4
X_dimension 1.16E+04
Delta_x 0.1
***End_of_Header***
X_value
21605.1 0.247955
21605.2 0.263234
21605.3 0.278015
21605.4 0.262064
21605.5 0.262756
21605.6 0.272522
21605.7 0.274048
21605.8 0.262451
21605.9 0.269775
21606.1 0.283051
21606.2 0.282193
21606.3 0.28717
21606.4 0.279999
21606.5 0.279541
21606.6 0.270386
21606.7 0.26623
21606.8 0.282593
21606.9 0.273885
21607.1 0.287628
21607.2 0.280886
21607.3 0.285492
21607.4 0.323486
21607.5 0.407562
21607.6 0.436249
21607.7 0.41961
21607.8 0.41039
21607.9 0.391693
21608.1 0.379486
21608.2 0.349274
21608.3 0.317534
21608.4 0.299835
21608.5 0.29227
21608.6 0.28595
21608.7 0.275269
21608.8 0.26825
21608.9 0.274811
21609.1 0.275726
21609.1 0.285339

```

Figura 4.3 Se muestra el archivo de salida de una serie de tiempo en formato **serie.txt**. En la cabeza del archivo se indica el canal de entrada de la tarjeta adquisitora (1), la fecha en tiempo real, el tiempo de integración de la tarjeta 0.1 (delta x). La primera columna es el tiempo en segundos, la segunda columna representa la amplitud en Volt.

De la figura 4.3 vemos en la primera columna que representa el tiempo en segundos que el valor inicial es diferente de cero, esto se debe a cuando iniciamos la adquisición de datos la tarjeta no toma como segundo inicial el tiempo del propio ordenador, sino el de inicio independiente de su propia cuenta, el programa LABVIEW corta y guarda los archivos cada 30 minutos y continua opteniendo los datos sino se para manualmente, esto se corrigió actualmente con el avance de programación de dicha tarjeta en el ambiente LABVIEW, pero en nuestras series de tiempo el resultado es el de la figura 4.3.

En el ambiente ORIGIN abrimos el archivo **serie.xls** para graficarlo, lo que vemos es que la primera columna es el intervalo de tiempo de interés en segundos pero no el tiempo real que deseamos. La manera de corregir lo anterior se hace con la instrucción en ORIGIN siguiente:

$$((col(A)+tiempo\ en\ segundos)/86400)$$

Una característica de inconveniente de este ambiente de paquetería ORIGIN, es que trabaja con archivos de tamaño limitado (1.6 Mb), debido a que al igual que EXCEL sólo permite la apertura de datos de hasta 65536 celdas en una columna. Sin embargo, es suficiente para graficar una serie de tiempo de aproximadamente 25 minutos (**figura 4.4**) intervalo en el que podemos trabajar para el tránsito de una fuente de radio 12 minutos antes y 12 minutos después.

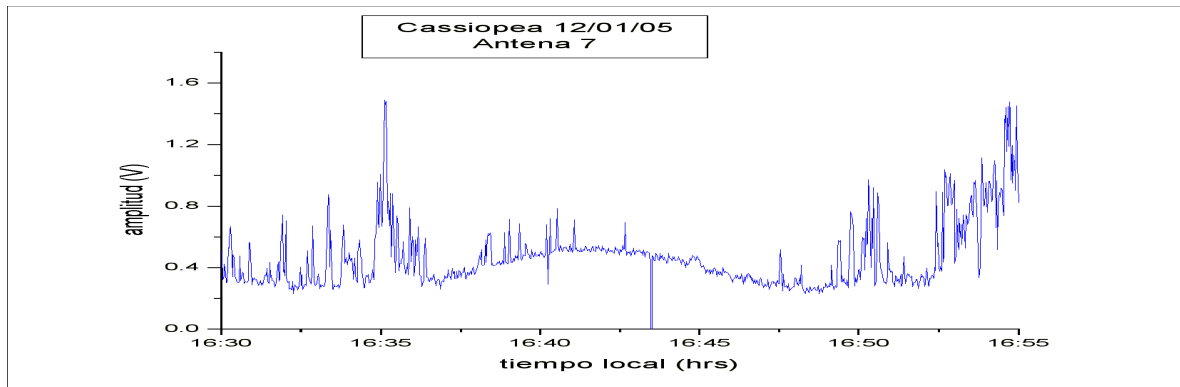


Figura 4.4 Serie de tiempo de 1.6 Mb graficada con el paquete ORIGIN donde el intervalo de tiempo es de 25 minutos.

y tiempo real juntas, seguido de los tránsitos de cada una de las fuentes en un intervalo de tiempo de ± 15 minutos a partir del máximo y, finalmente, se obtiene el promedio de los registros para cada fuente a una misma hora con el fin de comparar cada tránsito con ese promedio. El orden en el que se presentan los resultados de las fuentes de radio es: CASSIOPEA, CYGNUS A, SOL, NEBULA DEL CANGREJO y VIRGO A.

CASSIOPEA

La figura 4.5 muestra el tránsito de Cassiopea con un intervalo de 3 minutos 56 segundos aproximadamente entre un día y el siguiente, como se previó con el programa busca fuentes (sección 3.3).

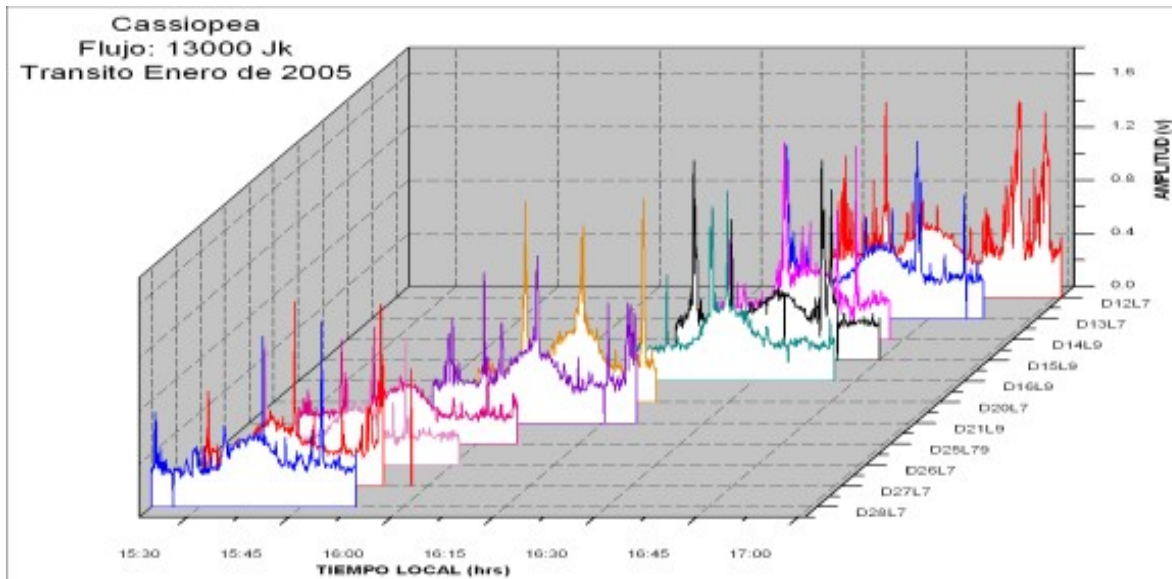


Figura 4.5 Tránsito en tiempo real de la fuente Cassiopea en el mes de enero de 2005. En el eje lateral derecho se muestran el día (D) y línea (L) de los tránsitos.

Se puede ver una similitud de la señal en cada día del tránsito respecto a un máximo en amplitud de 0.5 Volt promedio en cada una de las fuentes. Los huecos en los desplazamientos sobre el gráfico irregulares son debido a que no hubo registros de la fuente. La figura 4.6 muestra todos los tránsitos centrados alrededor del máximo de la señal, ± 15 minutos.

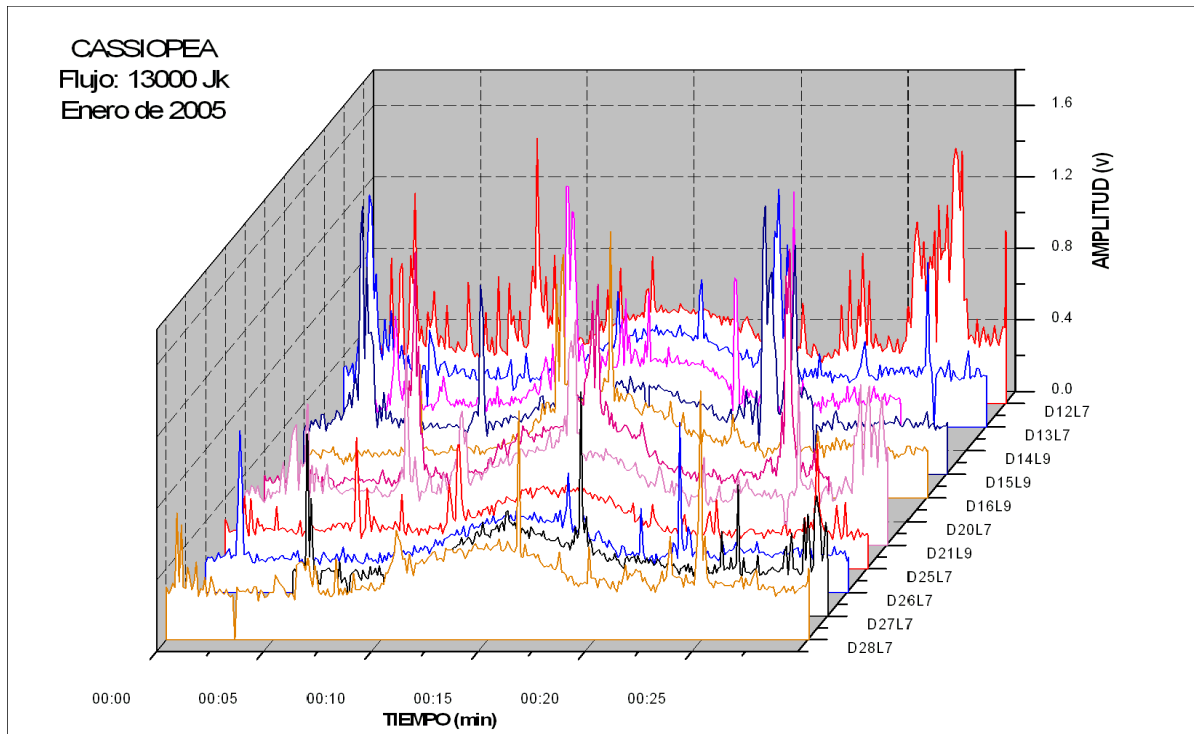


Figura 4.6 tránsito de Cassiopea en un intervalo de ± 15 minutos contados a partir del máximo de su amplitud. En el eje lateral derecho se muestran el día (D) y línea (L) de tránsitos.

Podemos apreciar un comportamiento regular de Cassiopea, así como también una ligera ganancia de sensibilidad de la antena 9 respecto de la antena 7, particularmente en días anteriores a 25, 26, 27 y 28 de esta última línea. Vemos también que hay un pico de amplitud considerable (1.4 V) que acompaña a la señal y se desplaza sin posibilidad de predecir su tiempo de ocurrencia con respecto al tránsito de la fuente. En general, el tránsito tiene lugar en un intervalo de 11 minutos en promedio durante el mes.

La figura 4.7 muestra la señal promediada del tránsito de Cassiopea. En el panel superior se muestra la señal construida a partir de las señales reales (sección 4.2) junto con el promedio de esta señal. Ambas tienen un máximo de 0.55 V. En el panel inferior sólo se muestra el ajuste al promedio. Vemos también que el mediano del intervalo sólo es de 25 minutos, esto se debe a que algunas series de tiempo no completan los 30 minutos de graficación debido a inconvenientes como el clima que mencionamos en secciones anteriores.

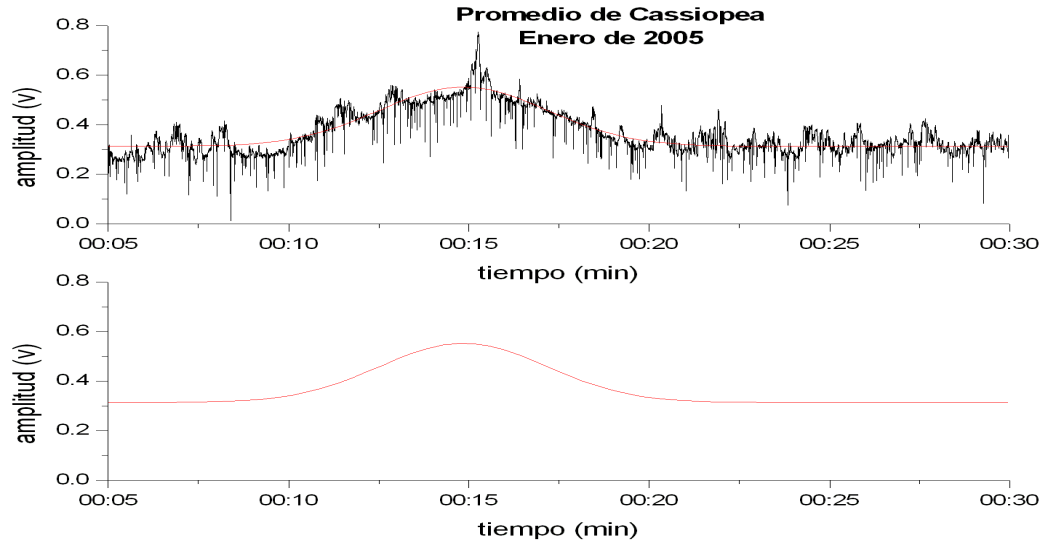
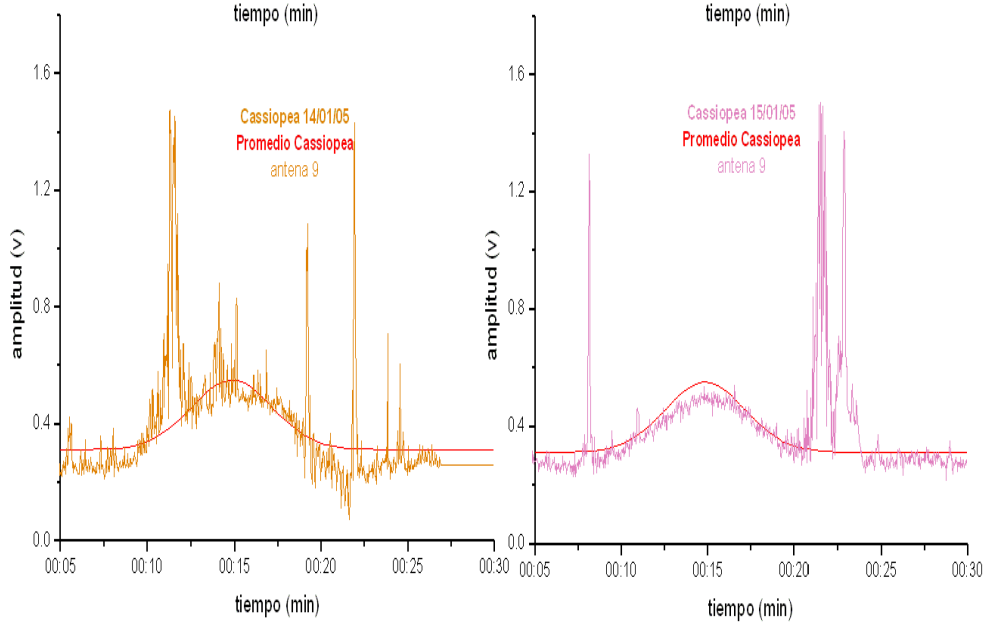
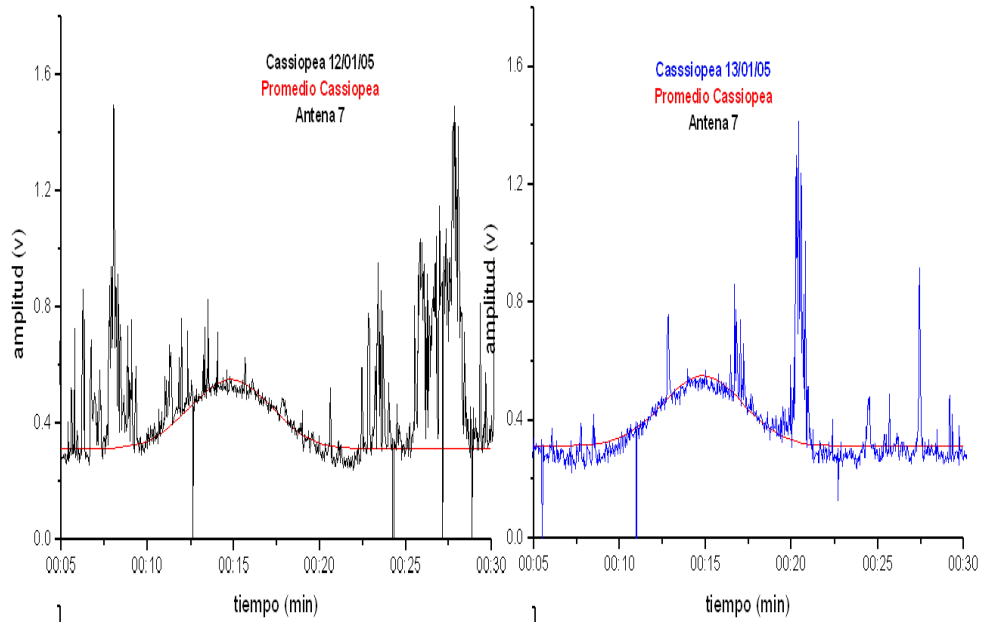
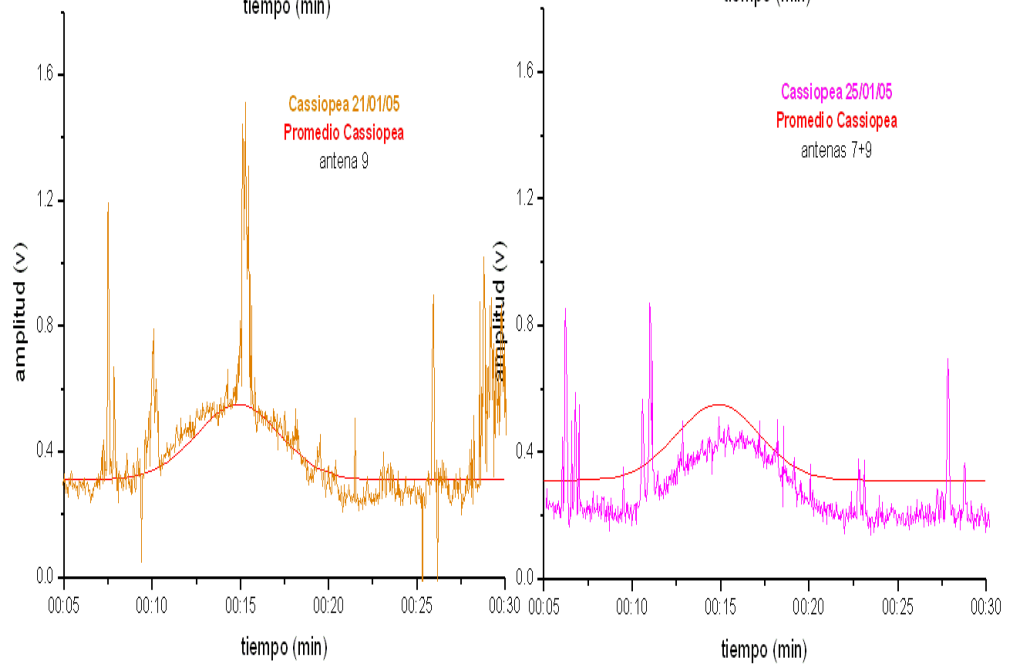
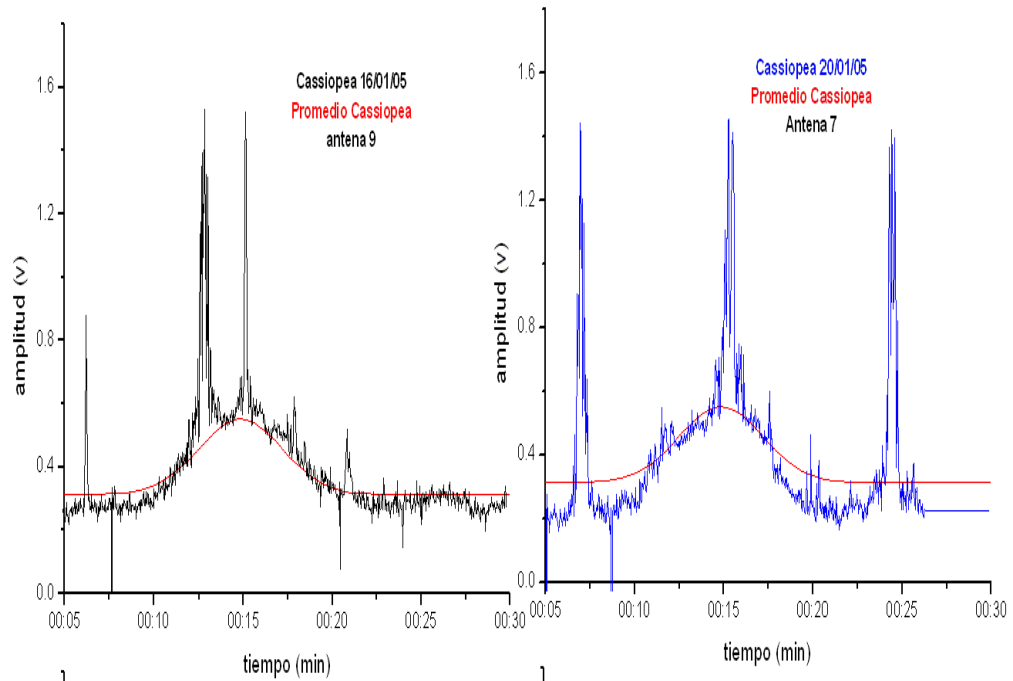


Figura 4.7 Promedio de Cassiopea durante los tránsitos de Cassiopea en el mes de enero de 2005.

La comparación de la señal real de cada tránsito con el promedio para Cassiopea en el mes de enero de 2005 se muestra en la figura 4.8, la cual se presenta en 4 espectros por plantilla.





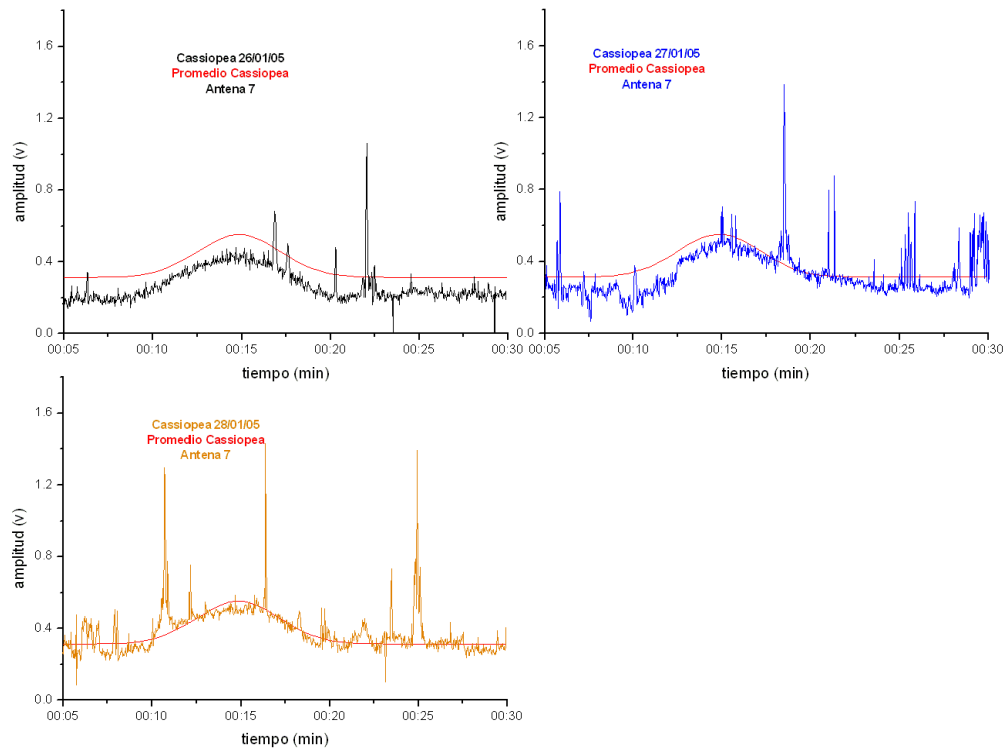


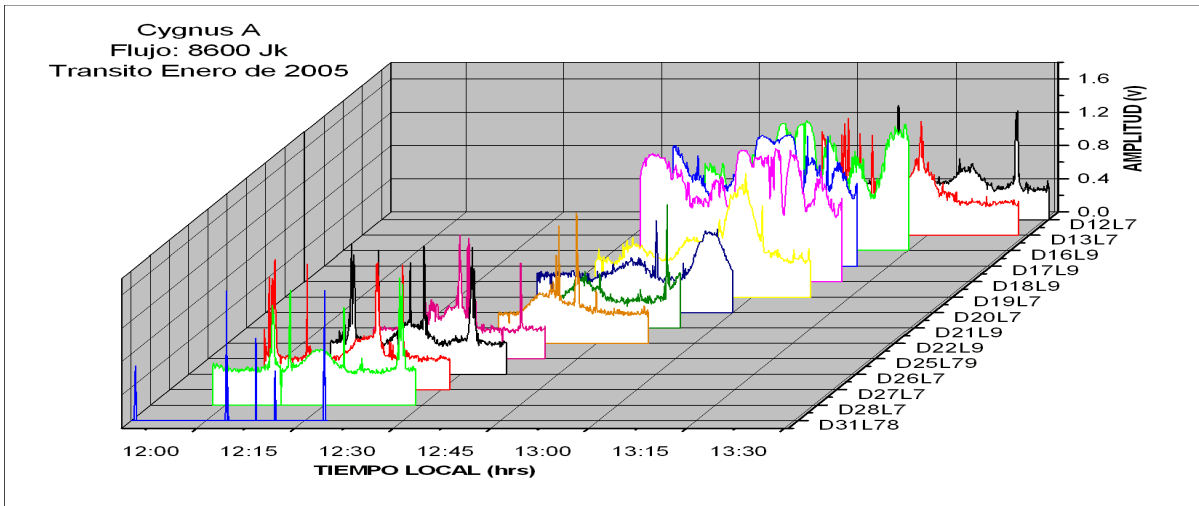
Figura 4.8 Comparación de la señal real de cada tránsito con el promedio para Cassiopea en el mes de enero de 2005.

En estas gráficas se ve que en los días 12, 13, 14, 15, 16, 21 y 28, la señal promedio concuerda con los máximos e intervalos de tiempo, independientemente de con cuál línea se trabajó. Para los días 20 y 27 el nivel máximo de la señal concuerda con el promedio pero no el nivel de ruido ya que éste está por debajo del promedio. Para los días 25 y 26 el nivel máximo y el ruido de la señal no concuerdan con el promedio. Dicha diferencia es del orden de 0.1 Volt. El caso del día 25 es muy claro ya que se utilizaron 2 líneas: la 7 y la 9 que, al no estar en fase, no dan el valor esperado para la suma. De hecho, este mismo problema se apreció cuando se analizaron todas las fuentes observadas.

CYGNUS A

El tránsito de la fuente Cygnus A se muestra en la figura 4.9. En ella se puede apreciar la **diferente intensidad** de esta fuente a lo largo de los diferentes tránsitos. El máximo de

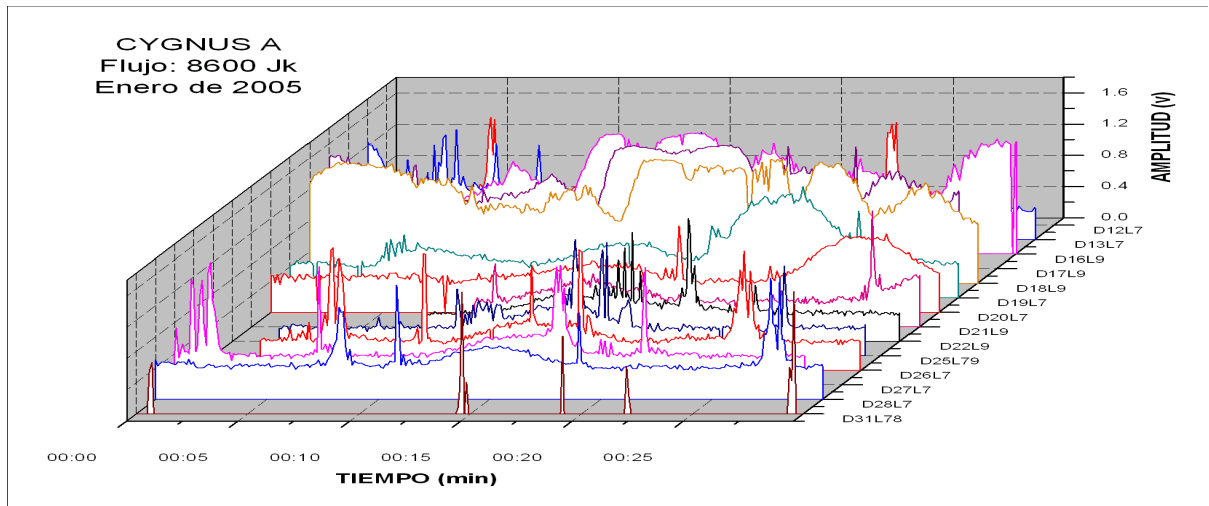
amplitud es de 0.6 Volt. Cabe mencionar que en el mes de enero, en los días 16, 17 y 18, Cygnus A coincidió con el tránsito del Sol (ver tabla 4.1). Debido a esto se presentó una



saturación de la señal en el receptor, encimándose ambas fuentes y la señal resultó distorsionada difícil de distinguir ambos tránsitos.

Figura 4.9 Tránsito de la fuente Cygnus A en el mes de enero de 2005. En el eje lateral derecho se muestran los días (D) y línea (L) de tránsitos.

La figura 4.10 muestra todos los tránsitos de Cygnus A, los días 16, 17, 18 y 19 se trabajo con la antena 9 y se observa una saturación del receptor por la coincidencia con el paso del sol. Los días posteriores (11, 12, 13, 14 y 15 de Enero de 2005) vemos una semejanza en amplitud de las señales con las antenas 7 y 9, suponemos que ocurriría la misma saturación del receptor si hubiera trabajado la antena 7 en esos días. En el caso particular del día 31 la caída de la amplitud se debe a que la suma de las antenas 7 y 8 no está funcionando como supondríamos, pude ser un problema en el receptor o el sistema amplificador de la antena 8, ya que la antena 7 tiene una mayor sensibilidad en los demás registros con los que se



trabajo con ella a diferencia de la antena 8.

Figura 4.10 Tránsito de Cygnus A en un intervalo de ± 15 minutos contados a partir del máximo de su intensidad ó amplitud. En el eje lateral derecho se muestran el día (D) y línea (L) de tránsitos.

La figura 4.11 muestra la señal promediada del tránsito de Cygnus A. En el panel superior se muestra la señal construida a partir de las señales reales junto con el **ajuste al promedio** de esta señal. Ambas tienen un máximo de 0.78 V. En el panel inferior sólo se muestra el **ajuste al promedio**. Debido a la interferencia solar, no podemos afirmar que el promedio sea la **intensidad** característica de Cygnus A. En Julio de 2004 cuando se registro el tránsito solar de saturo el receptor cuando graficamos dichas sereies de tiempo en los días 14, 15 y 16 de Julio de 2004 el gráfico fue el mismo que la figura anterior.

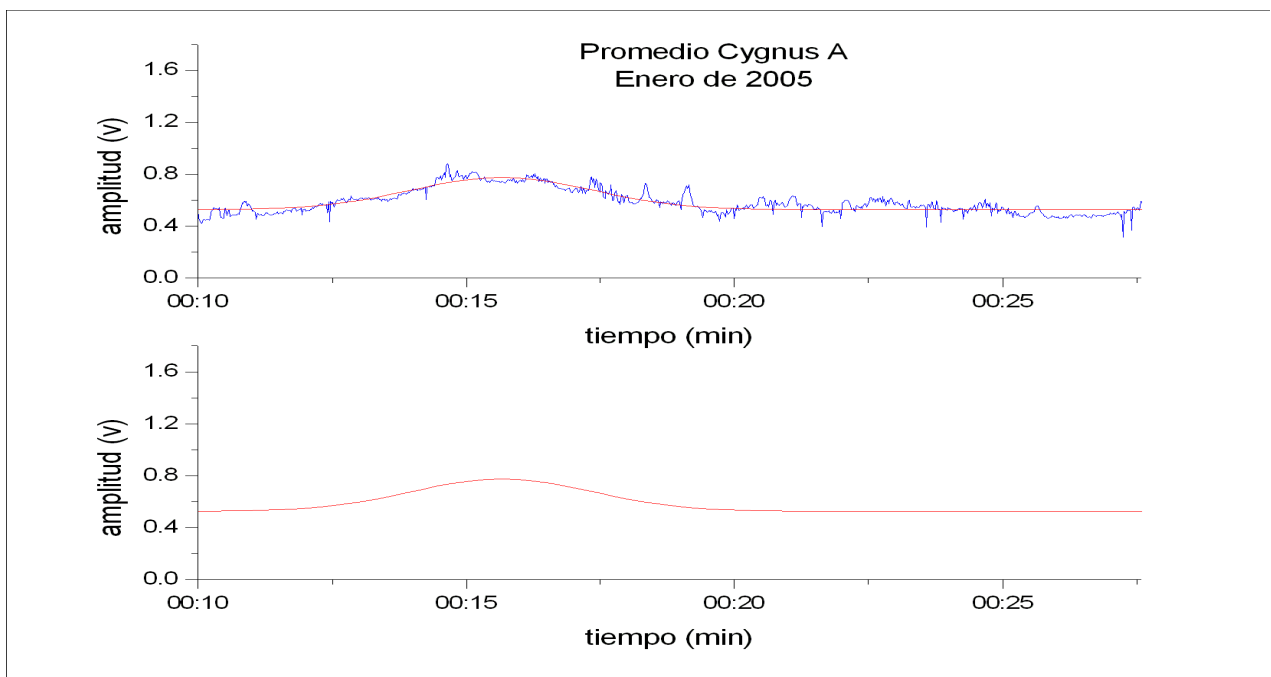
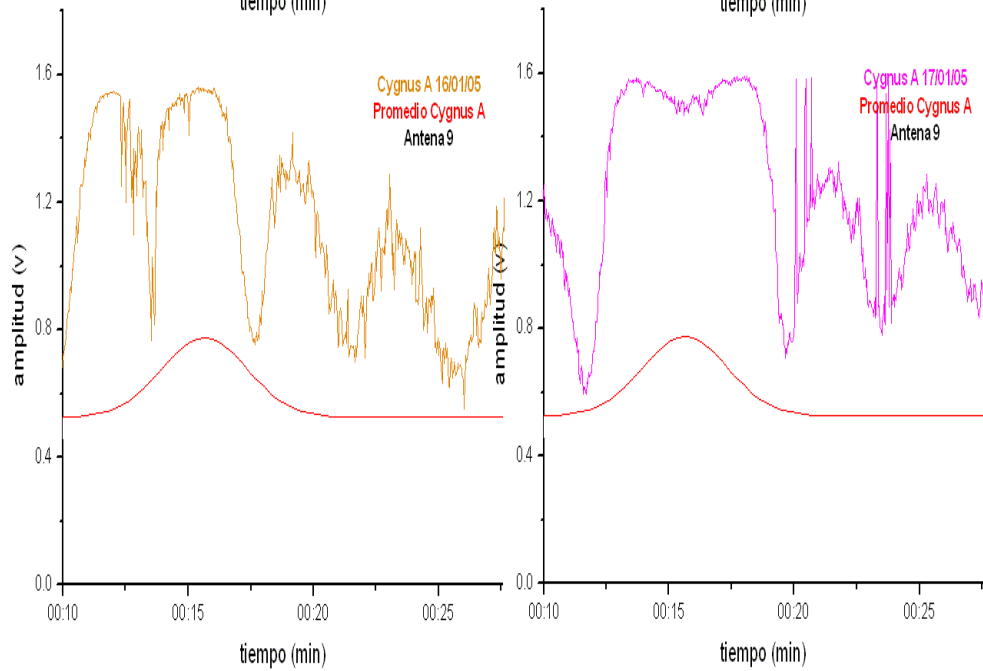
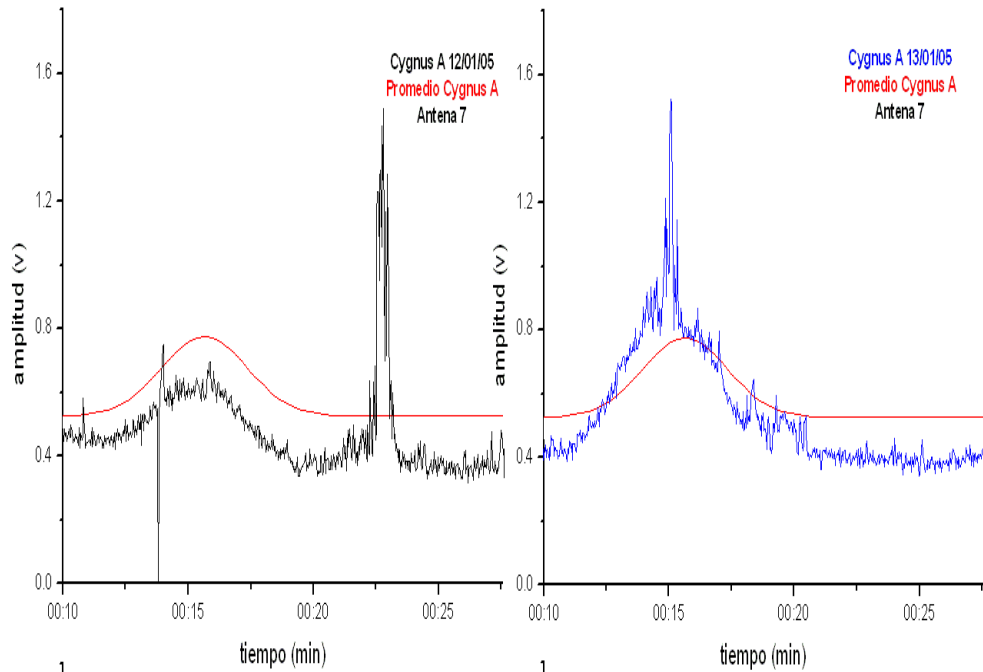
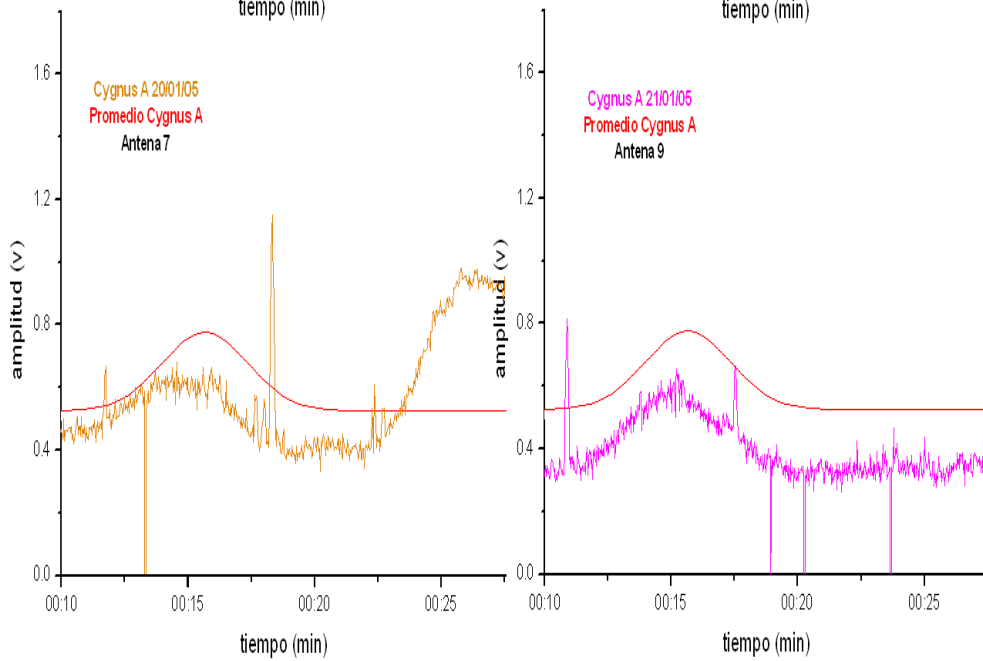
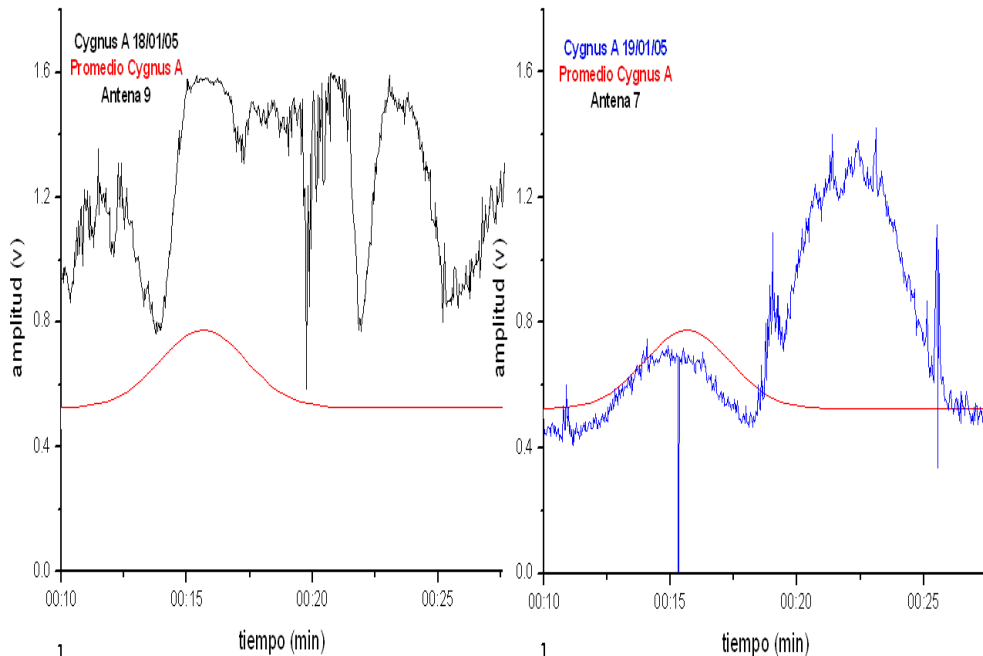
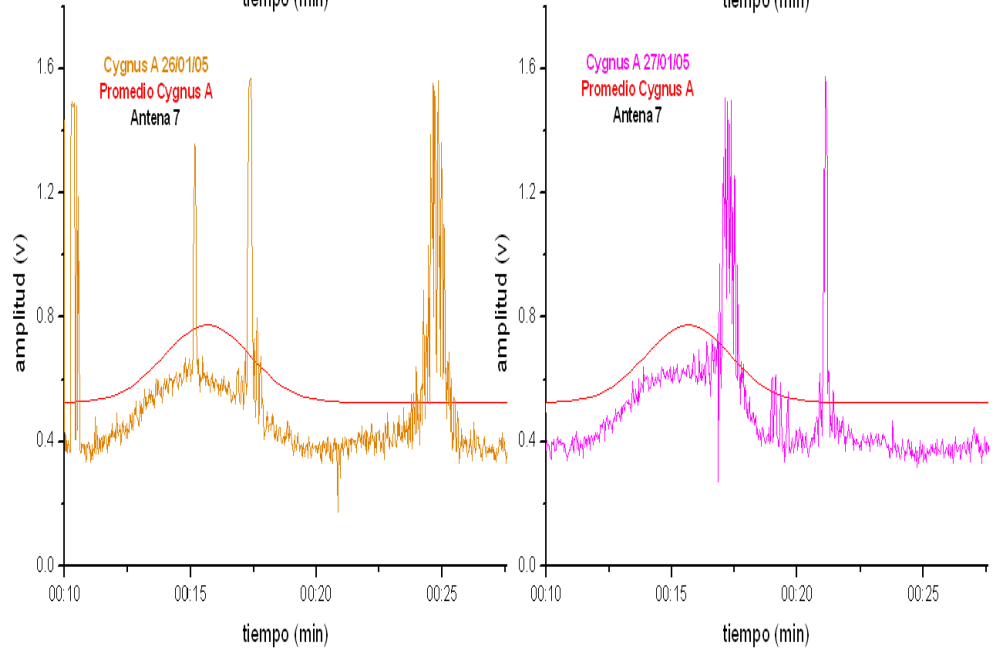
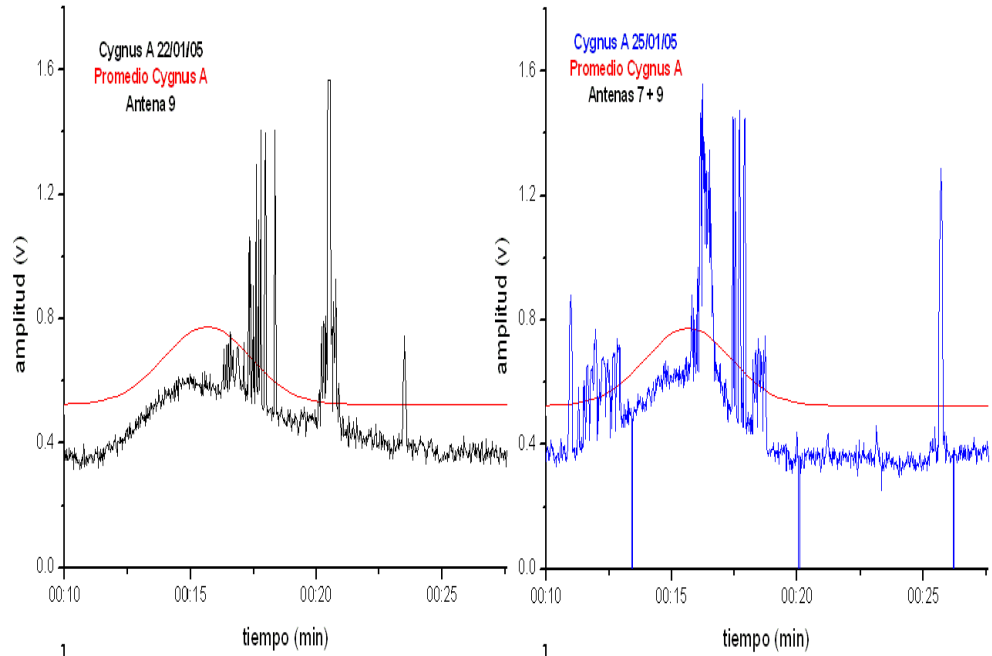


Figura 4.11 Promedio de los tránsitos de Cygnus A en el mes de enero de 2005.

El promedio superpuesto de los tránsitos de Cygnus A en el mes de enero de 2005 se muestra en la figura 4.12. De nuevo, debido a la interferencia solar el nivel promedio de ruido no corresponde con el promedio de Cygnus en el mes. Por lo tanto, los días 12 y 13 no corresponden al tránsito de la fuente, manteniéndose el nivel de ruido por debajo del promedio. En los días 16, 17, 18 y 19 no se puede ni siquiera ver la señal de Cygnus por la saturación del receptor.







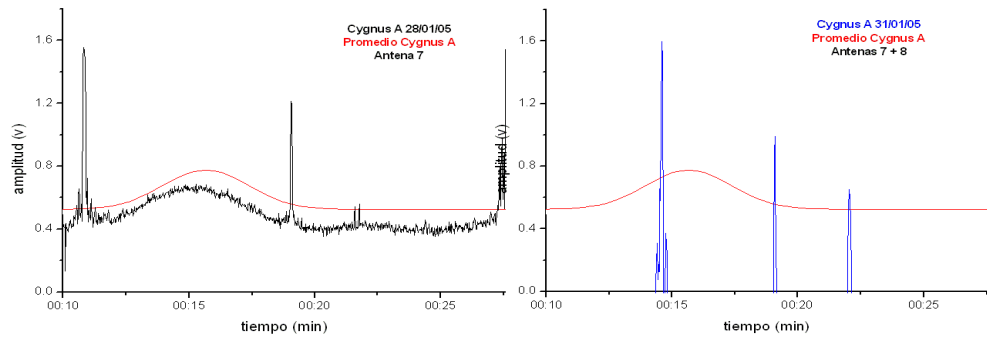


Figura 4.12 Promedio superpuesto de los tránsitos de Cygnus A en el mes de enero de 2005.

Los días 20, 21, y 22 posteriores a la saturación del receptor se ve cómo la diferencia de correspondencia en amplitud entre el promedio y la señal es menor, siendo ésta del orden de 0.2 Volt. El día 25 en que se sumaron las señales de las antenas 7 y 9 la correspondencia entre el promedio y la señal es similar al día 22, pero además observamos un ruido asociado a la señal, en los primeros 5 minutos, cosa que no había aparecido en Cygnus A en días anteriores. En los días 26, 27 y 28 la diferencia en amplitud entre el promedio y la señal se redujo a 0.1 Volt, debido a que el tránsito del sol ya estaba a 35 minutos de Cygnus A. Por último, en el día 31 la suma de las antenas 7 y 8 produjo una drástica disminución de la señal (-0.2 Volt) y no se observó un comportamiento de Cygnus A como en los días anteriores, comparado con el promedio.

SOL

La figura 4.13 muestra el tránsito del Sol en un intervalo de tiempo local 12:57 – 13:00. Como se mencionó en el caso de Cygnus A, hubo una interferencia entre las señales del Sol y Cygnus A. En los días posteriores a la coincidencia con Cygnus A, se ve un relajamiento del máximo hasta su promedio global de amplitud 0.85 Volt.

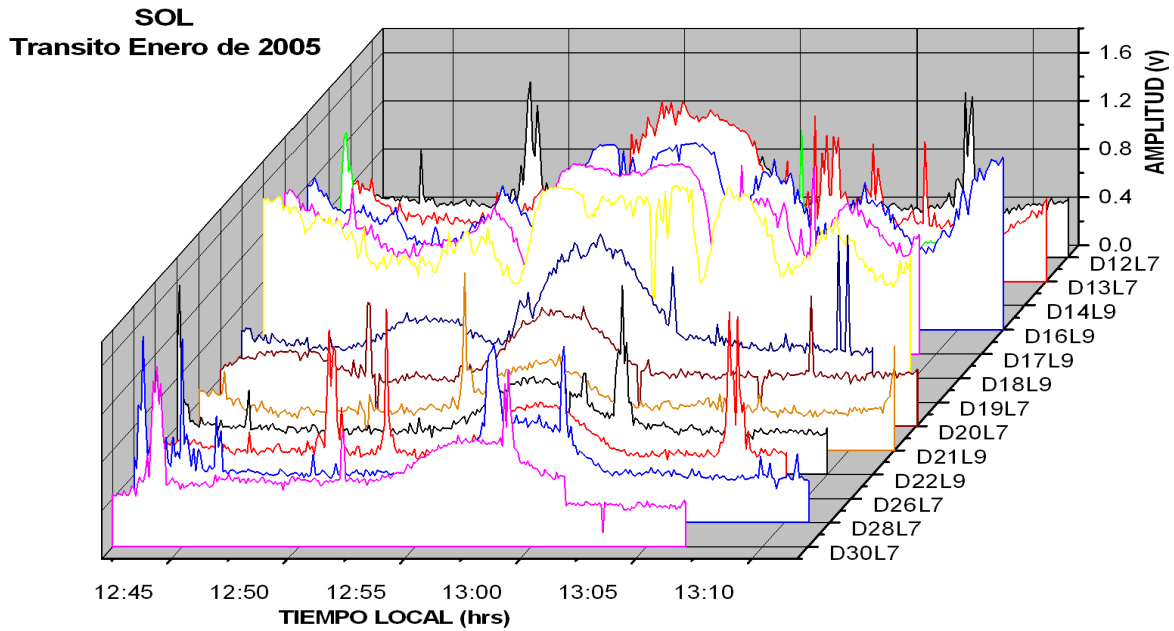


Figura 4.13 Tránsito del Sol en el mes de enero de 2005. En el eje lateral derecho se muestra los días (D) y la línea (L) de tránsitos y en el eje horizontal se muestra el tiempo local en horas.

La figura 4.14 muestra la señal promedio del tránsito del Sol. En el panel superior se muestra la señal construida a partir de las señales reales junto con el promedio de esta señal. Ambas tienen un máximo de 1.1 V. En el panel inferior sólo se muestra el **ajuste al promedio**.

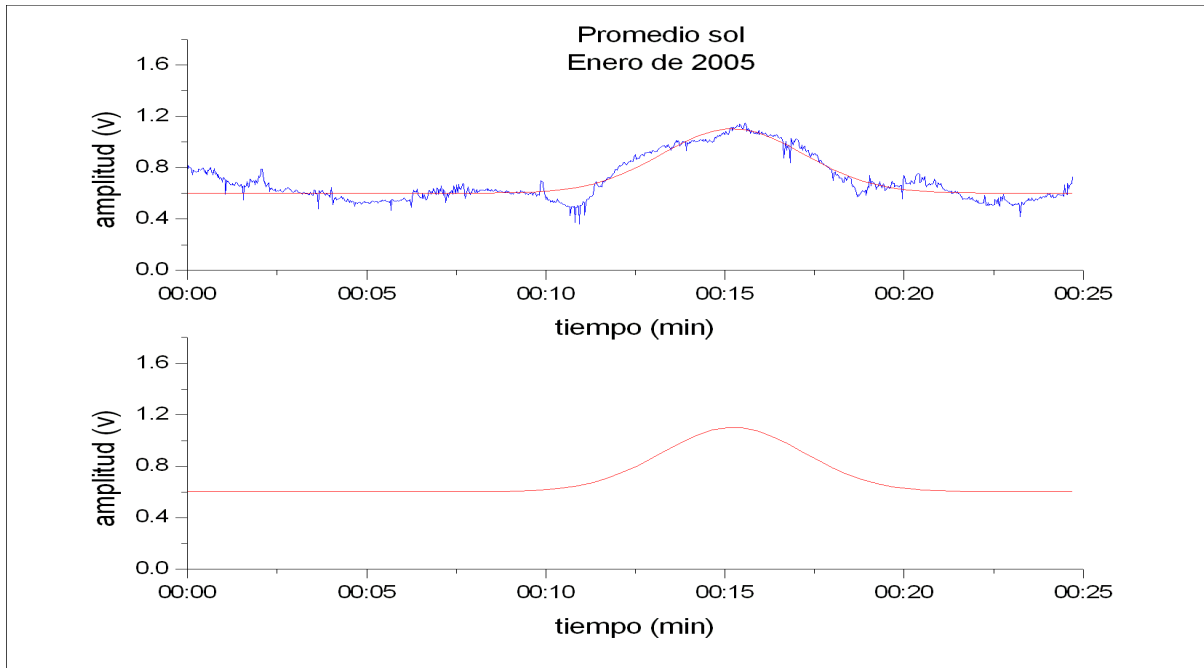
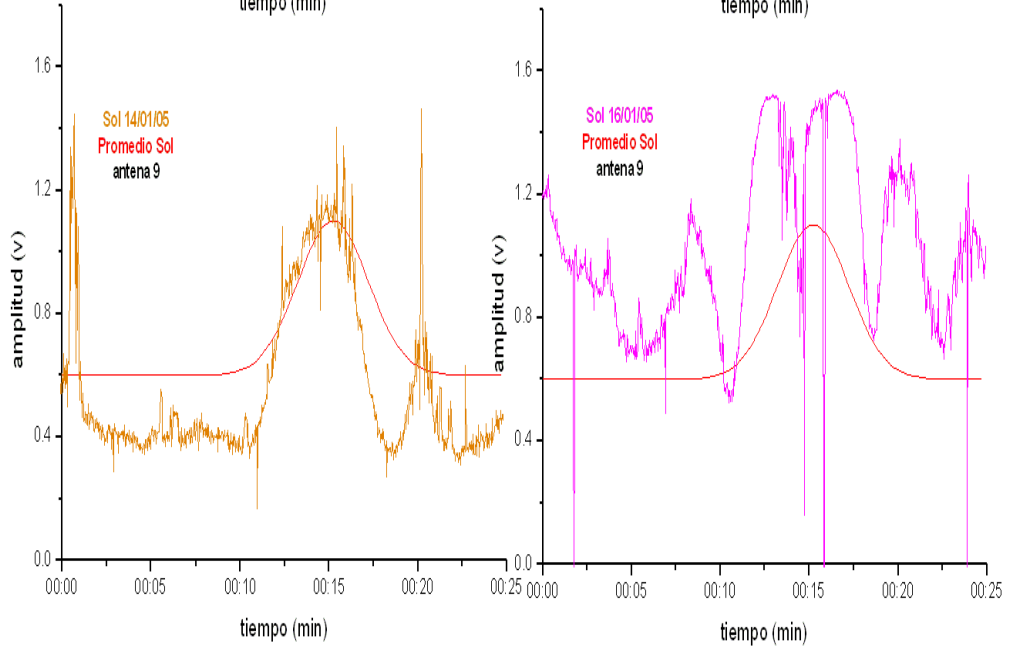
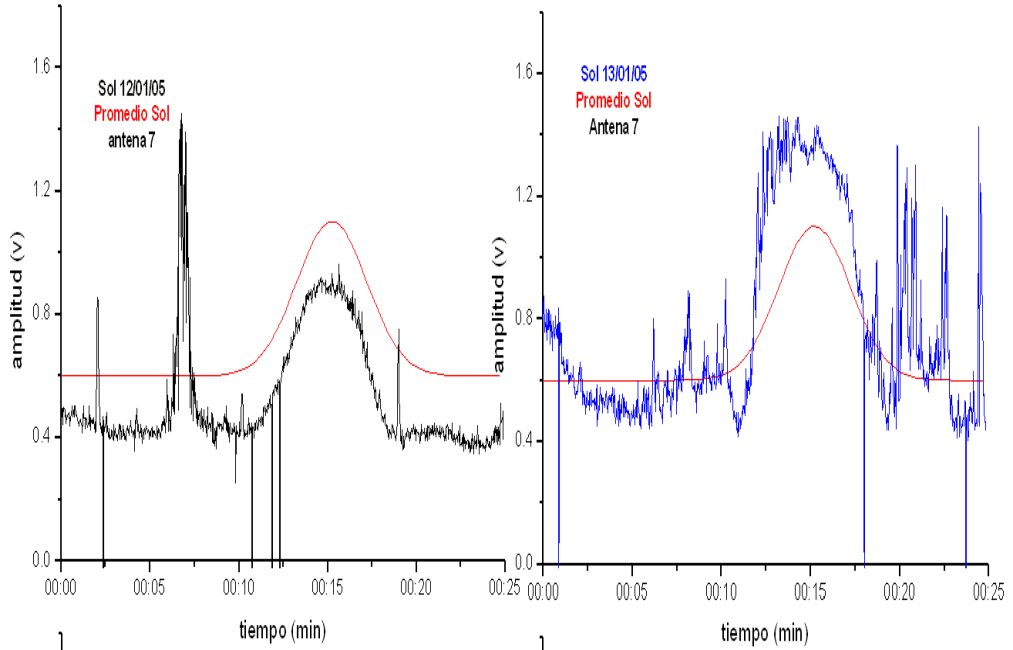
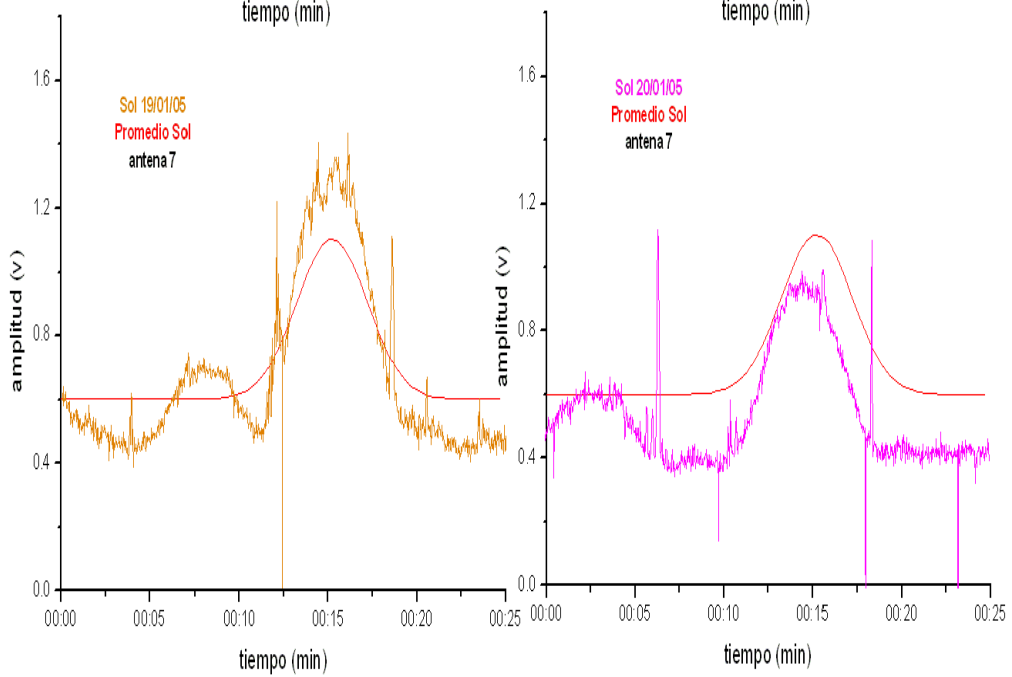
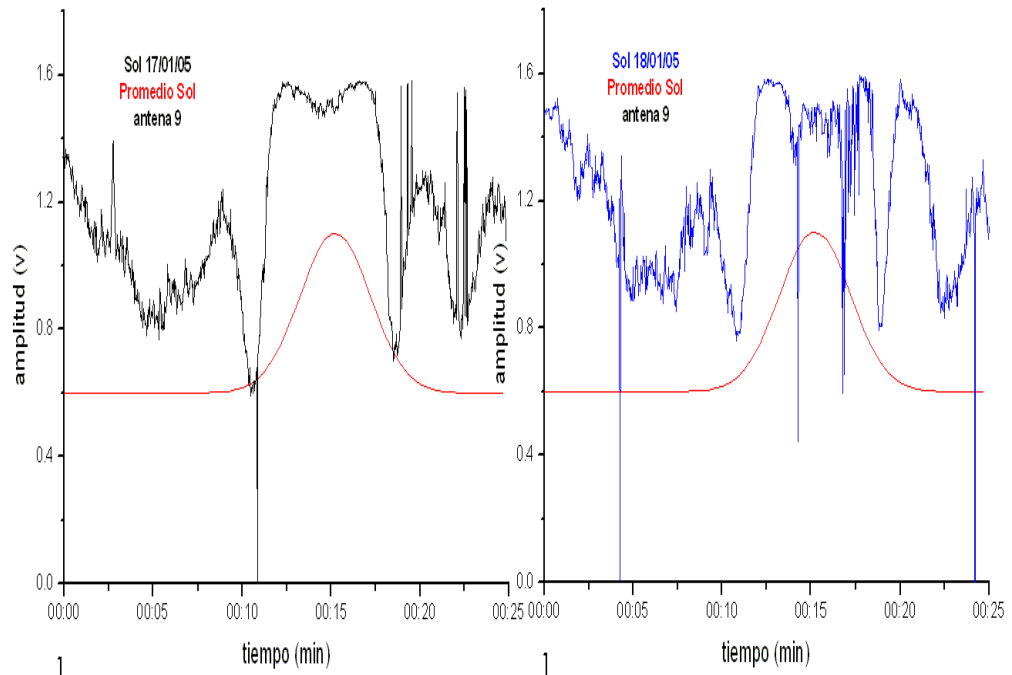
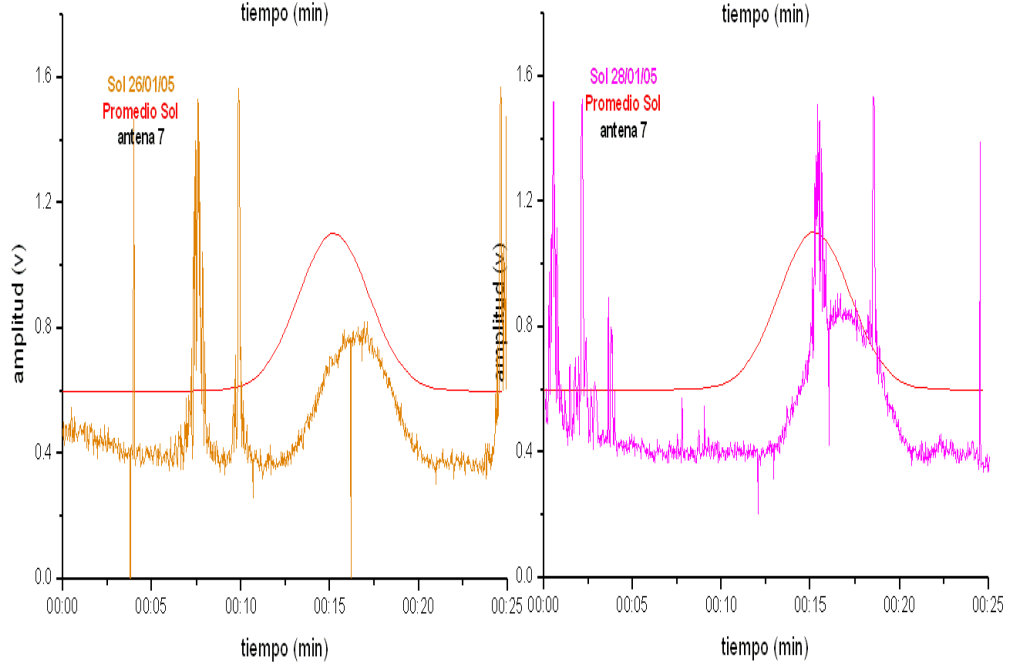
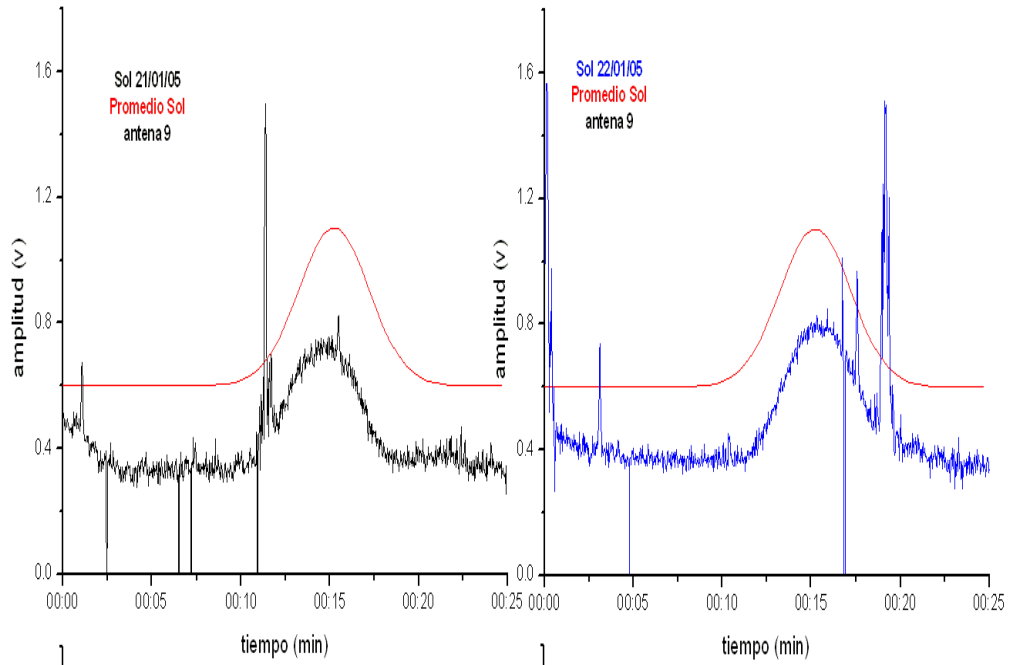


Figura 4.14 Promedio de los tránsitos del Sol en el mes de enero de 2005.

La figura 4.15 muestra el promedio comparado con cada uno de los tránsitos del Sol, de donde podemos señalar lo siguiente: en los días 12, 13 y 14 el nivel de ruido entre el promedio y la señal es de 0.2 Volt de diferencia y sólo en el día 12 coincide el máximo de la señal con el máximo del promedio, considerando que Cygnus A se encontraba 20 minutos más adelante del Sol. Durante los días 16, 17, 18 y 19 se saturó el receptor, por la suma de los tránsitos de Cygnus A y el Sol, y por tanto no pudimos comparar el promedio con la señal. Los días 20, 21 y 22 hubo un ligero desplazamiento del máximo de la señal con respecto al máximo del promedio de 50 segundos de tiempo, y una diferencia entre los niveles de ruido de 0.2 Volt. En los días 26, 28 y 30 las características de la señal fueron similares a los tres días anteriores pero con desplazamiento entre los máximos de tiempo.







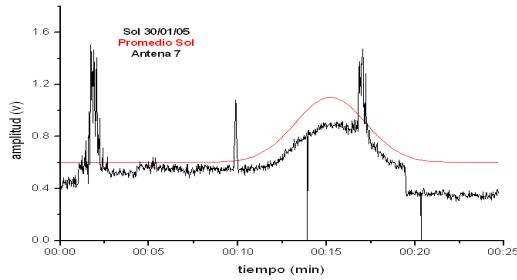


Figura 4.15 Promedio superpuesto a los tránsitos del Sol en el mes de enero de 2005.

Cabe mencionar que hay un pico de igual amplitud al máximo del Sol y una duración de 30 segundos que antecede a éste en ± 8 minutos, y que se va desplazando en ese intervalo de tiempo irregularmente. Cuando se registró por primera vez en julio de 2004 el tránsito del Sol, este pico apareció antes y después del tránsito con casi la misma separación de ± 8 minutos.

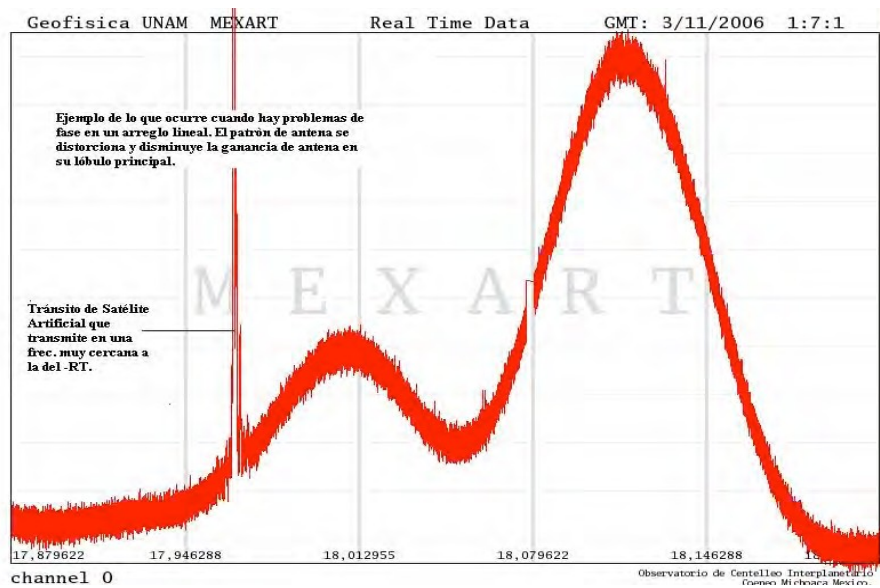


Figura 4.16 Registro del tránsito del sol (3 de Noviembre de 2006) .Cuando en la línea en cuestión hay problemas de fase, sea por diferencia de longitudes de uno de los cables o por corto circuito en algún balun o por alguna otra razón. (Tomada de Sierra, 2006).

La figura 4.16 muestra la serie de tiempo del sol el día 3 de Noviembre de 2006, se ve el mismo pico precediendo al máximo del tránsito solar, aún cuando se le realizaron mejoras al sistema de amplificadores en la líneas 1 a 16 (ver sección 3.4).

NEBULA DEL CANGREJO

La figura 4.17 muestra el tránsito de Nebulosa del Cangrejo en el mes de enero de 2005, el cual inició a las 22:10 de la noche. Sólo se obtuvieron tres registros de esta fuente debido a que no se operó de manera continua, por cuestiones de seguridad del sistema, como se mencionó en la sección 4.1. Vemos que el nivel de ruido fue muy bajo como consecuencia de la disminución del ruido electromagnético ambiental generado por el hombre. Esto favoreció a nuestra observación porque aunque el flujo de esta fuente es muy pequeño (1500 Jy) que es mucho menos intenso que el de las fuentes tratadas antes, fue posible hacer una observación clara de su tránsito.

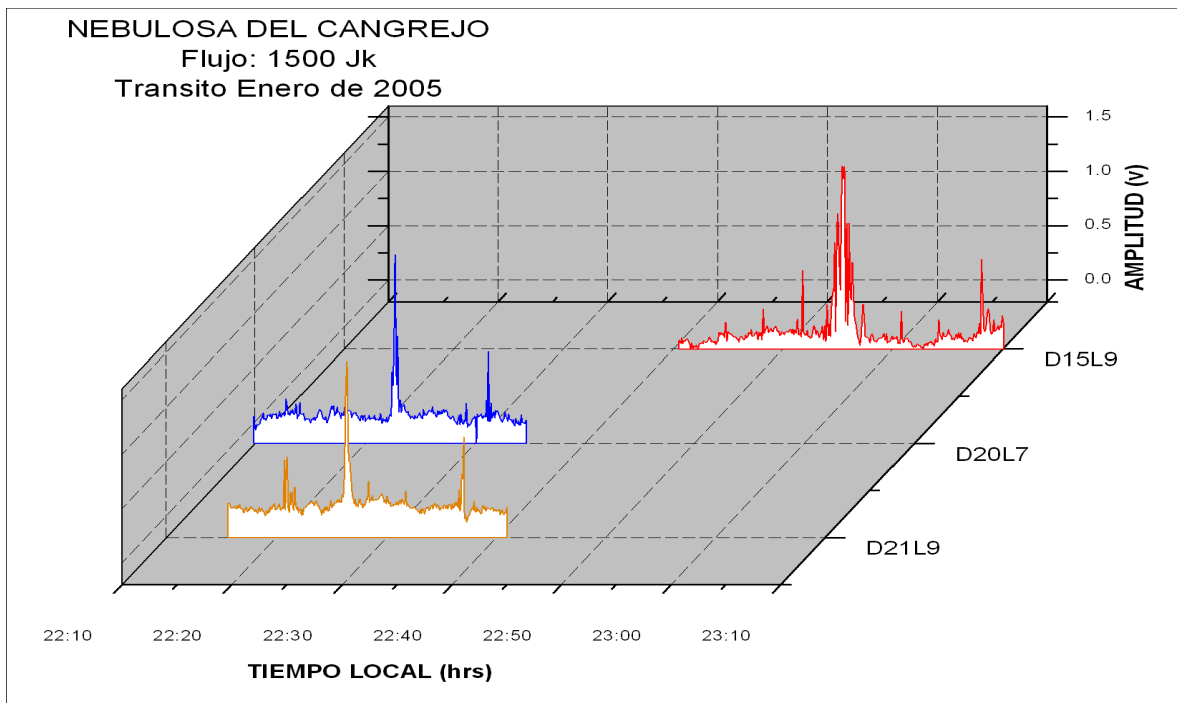


Figura 4.17 Tránsito de la fuente Nebulosa del Cangrejo en el mes de enero de 2005. En el eje lateral derecho se muestran el día (D) y la línea (L) de los tránsitos.

La figura 4.18 muestra los tránsitos de los días 15, 20 y 21, con un nivel de ruido promedio es de 0.0 Volt, y un pico máximo promedio de 0.5 Volt. Cabe señalar que a la hora local en que se adquirieron los tránsitos el nivel de ruido de las antenas es casi siempre cercano a 0 Volt. Esta característica fue general en todos los registros nocturnos de ruido, independientemente de si se observó una fuente o no.

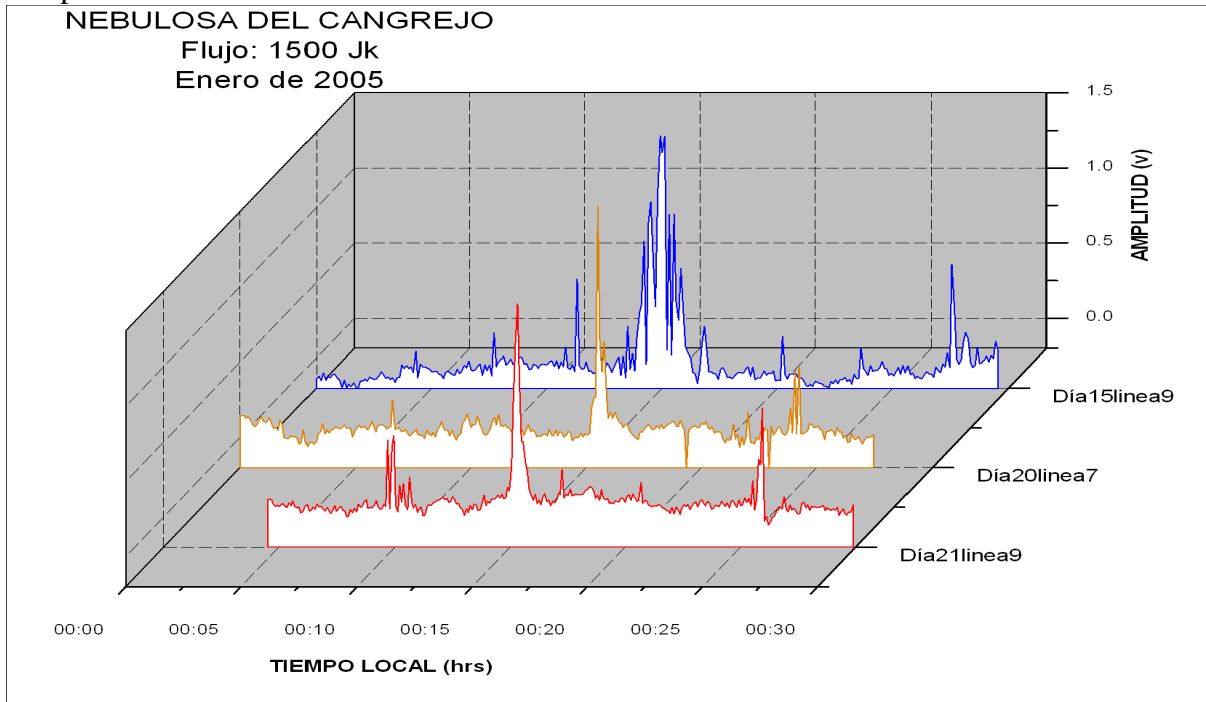


Figura 4.18 Tránsito de Nebulosa Del Cangrejo en un intervalo de ± 15 minutos contados a partir del máximo de su amplitud. En el eje lateral derecho se muestra el día (D) y línea (L) de los tránsitos.

La figura 4.19 muestra en la imagen superior el promedio de Nebulosa del Cangrejo con la señal. En la imagen inferior se muestra el promedio sin de la señal, podemos ver que el máximo de amplitud de 0.65 Volt y un nivel de ruido promedio de 0.05 Volt. Siendo una fuente de flujo de 1500 Jy, vemos que a diferencia de las otras fuentes más intensas, su intervalo de tránsito es de 2.5 minutos pero diferenciable del ruido electromagnético ambiental que capta el radiotelescopio.

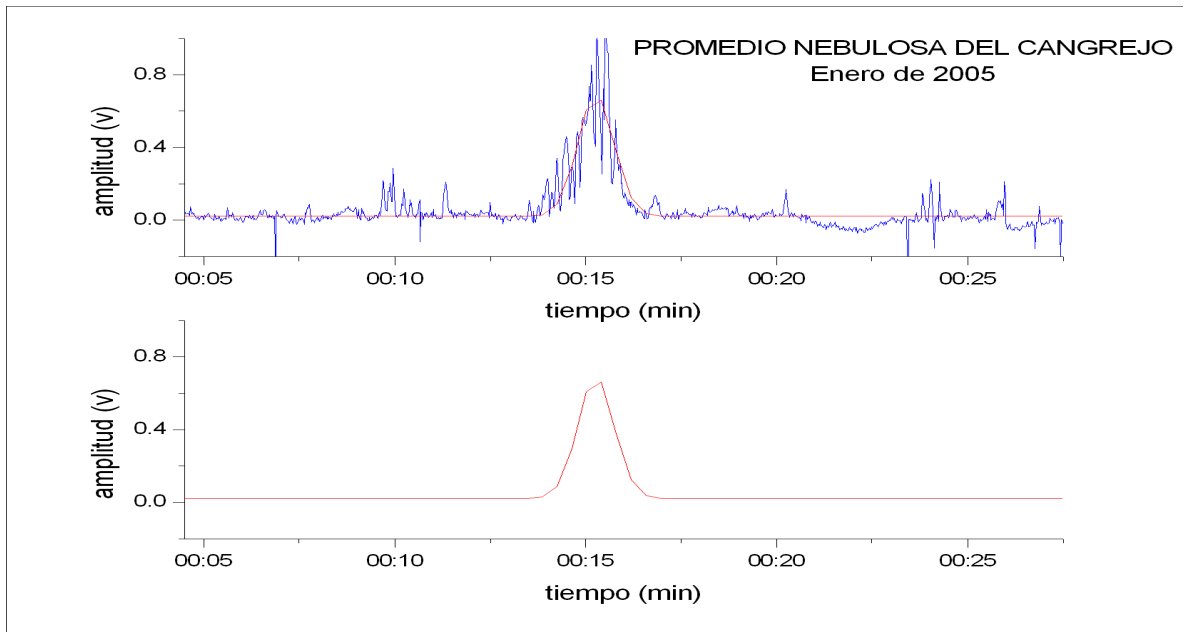


Figura 4.19 Promedio de Nebulosa Del Cangrejo en el mes de enero de 2005.

La figura 4.20 muestra el promedio comparado con cada uno de los tránsitos de Nebulosa del Cangrejo. Vemos la correspondencia del promedio y los tránsitos al superponerlos respecto a la amplitud del máximo y mínimo. Debido a que son pocos registros a comparar, no podemos afirmar que las **intensidades** de las series de tiempo son la huella de la fuente, pero sí hay un ligero aumento del nivel de ruido (0.01 V) 2 minutos antes y después del tránsito que la diferencia del resto en estos tres registros. Vemos también que en los días 15 y 16, en que trabajó la antena 9, hay una mayor sensibilidad, con picos mas definidos en el máximo, que en el día 20, cuando trabajó la antena 7, que como se ha visto, es menos sensible.

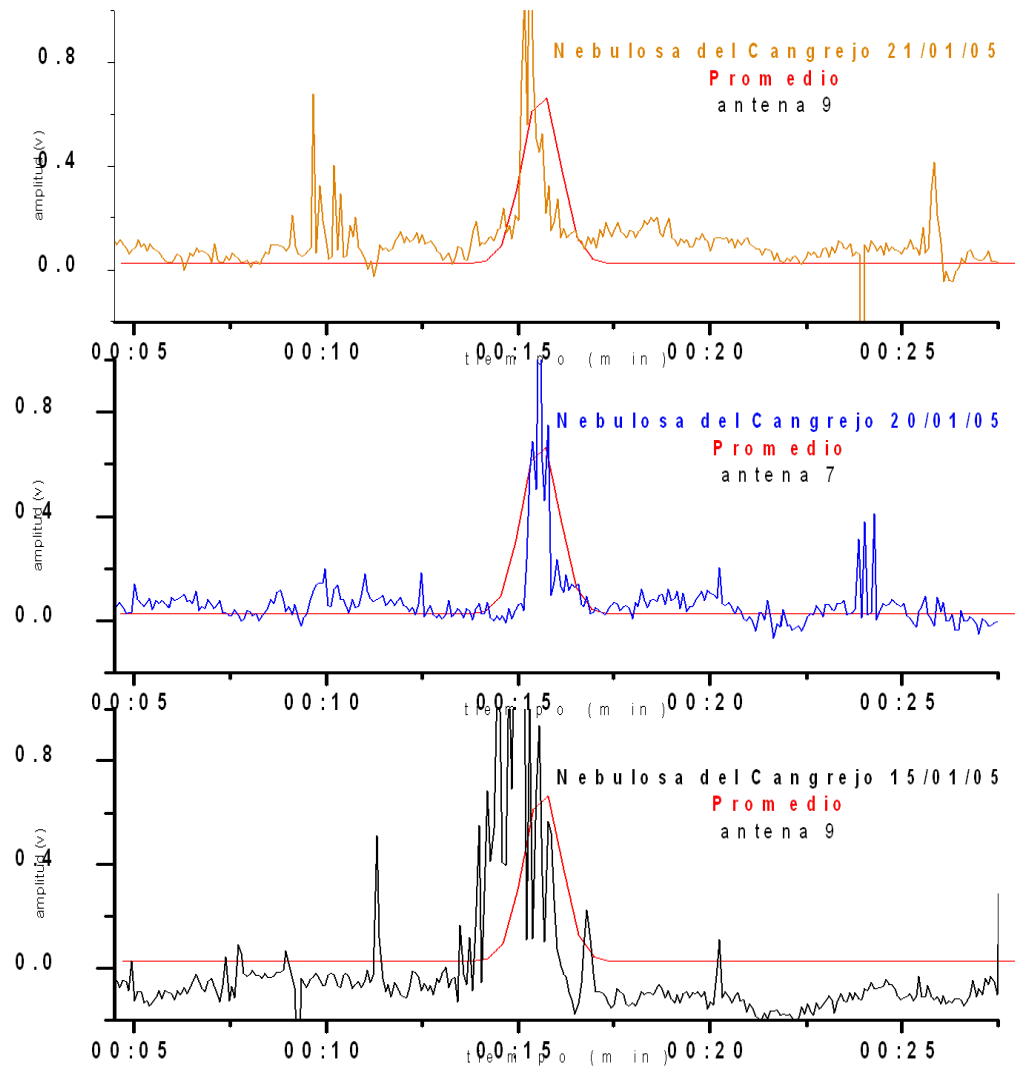


Figura 4.20 Promedio aplicado a cada uno de los tránsitos de la Nebulosa del Cangrejo en el mes de enero de 2005.

VIRGO A

La figura 4.21 muestra el tránsito de la fuente Virgo A en el mes de enero de 2005. Como en el caso de Crab Nebula, por motivos de carácter técnico y de seguridad sólo se observaron dos registros que lograron diferenciarse del ruido ambiente.

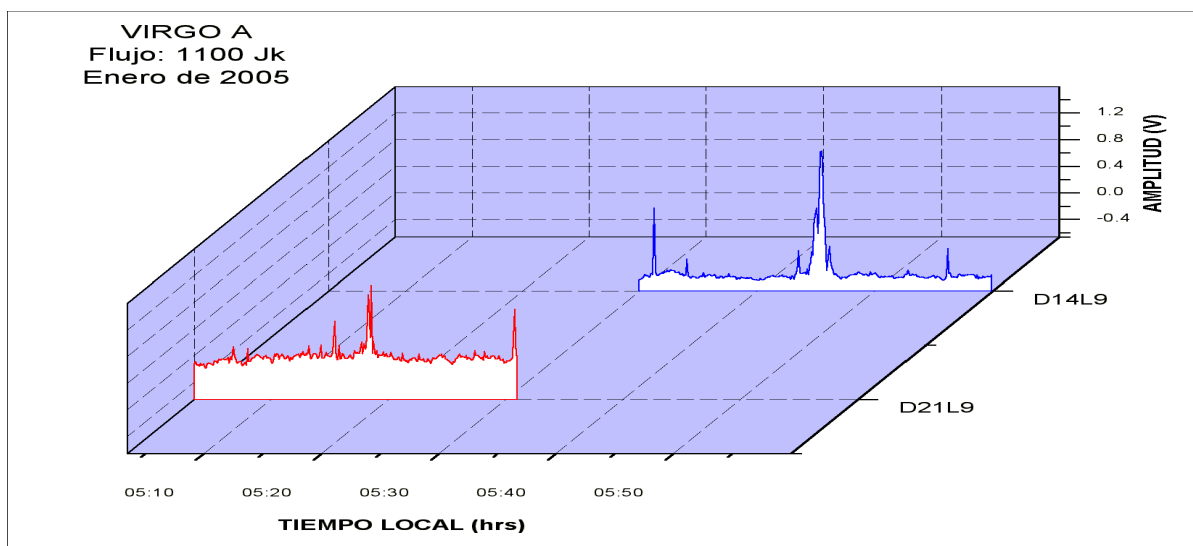


Figura 4.21 Tránsito de Virgo A en el mes de enero de 2005. En el eje lateral derecho se muestran el día (L) y línea (L) de los tránsitos.

La figura 4.22 muestra el tránsito de Virgo A en el mes de enero, que al igual que para el caso de Nebulosa del Cangrejo vemos que el nivel de ruido fue bajo, del orden de 0.05 Volt, y se aprecia un pico máximo de 0.3 Volt en el caso del día 14, mientras que el día 21 el nivel de ruido es de 0.01 Volt, y el máximo de amplitud es de 0.6 Volt. Considerando que Virgo A, con un flujo de 1100 Jy, es la menos intensa de todas las fuentes registradas por el radiotelescopio, y que para ella el ruido ambiental es muy pequeño, se pudiera establecer, por lo menos para el estado en el que se encontraba el radiotelescopio en ese momento, que Virgo A marcó un límite inferior de observación para la búsqueda de fuentes.

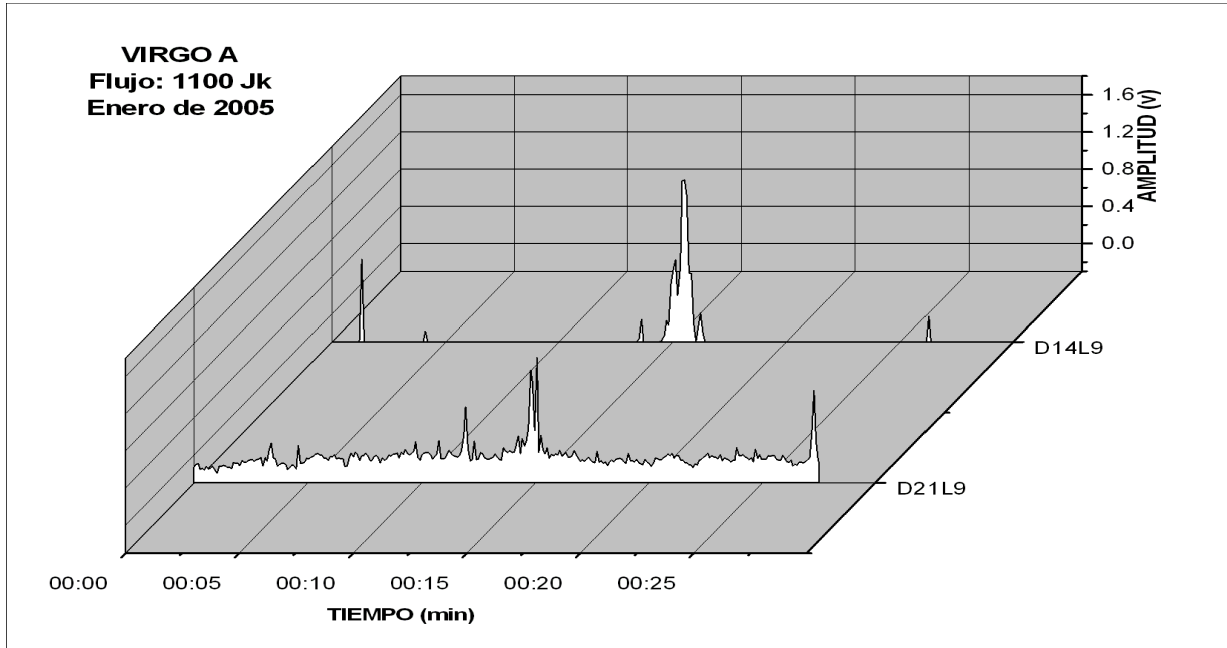


Figura 4.22 Tránsito de Virgo A en un intervalo de ± 15 minutos contados a partir del máximo de su amplitud. En el eje lateral derecho se muestra el día (L) y línea (L) del tránsito.

Las figura 4.23 muestra en el panel superior el promedio de Virgo A junto con su señal. El panel inferior muestra el promedio sin la señal. Vemos un promedio que no se parece en nada a la señal de Virgo A, debido a que el nivel de ruido ambiental no es diferenciable del propio tránsito. Debido a que sólo se tuvieron dos registros de Virgo A, el ajuste al promedio fue casi imperceptible, se sumaron las dos columnas de intensidad en ORIGIN de los registros y se dividió entre el número de registros.

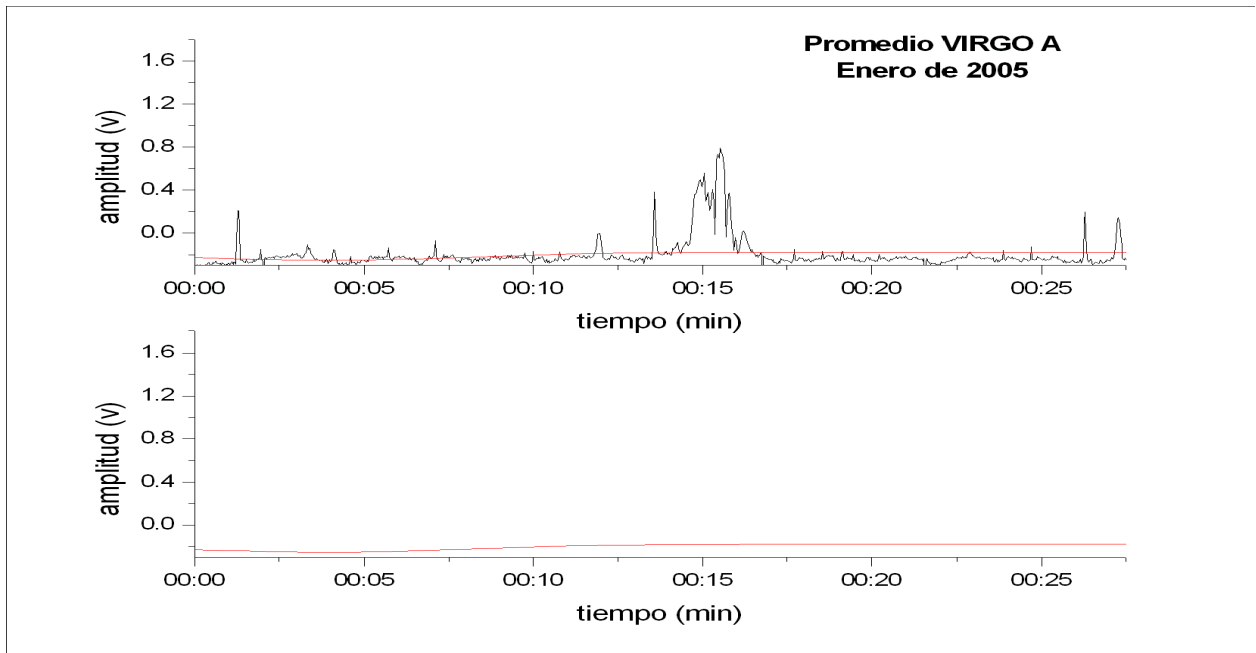


Figura 4.23 Promedio de Virgo A en el mes de enero de 2005.

La figura 4.24 muestra el promedio aplicado a los tránsitos de Virgo A, donde vemos que no corresponden al promedio de nivel de ruido -0.22 Volt de amplitud. La señal tiene un pico máximo de 0.42 Volt y un intervalo de 70 segundos de tránsito. Cabe mencionar que este tránsito se puede confundir fácilmente con el ruido interno asociado al radiotelescopio ya que -0.22 Volt fue el nivel de ruido ambiente en el mes de enero en ese tiempo local. Por lo tanto debido a que sólo hubo dos registros de Virgo A, no podemos afirmar que sea la **intensidad** característica de la fuente, pues es fácilmente confundible con interferencias crecenas a la frecuencia de operación del radiotelescopio.

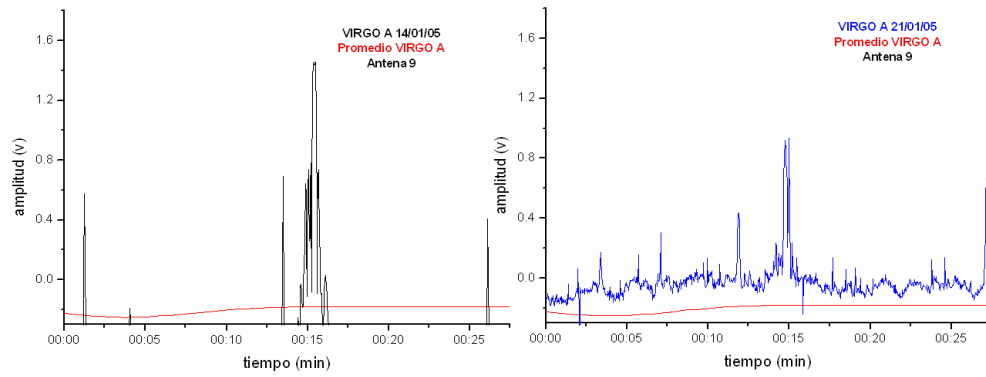


Figura 4.24 Promedio aplicado a los tránsitos de Virgo A en el mes de enero de 2005.

DISCUSIÓN

Considerando que el sol cumple un recorrido por día de 360° en un tiempo de 24 horas, tenemos una razón de desplazamiento de 1° por cada 4 minutos, y una altitud de rango 0° a 90° donde en este último se considera el sol al cenit de radiotelescopio, podemos entonces determinar el promedio del ancho del lóbulo principal a potencia media (HPBW) de las fuentes de radio registradas durante el mes de Enero de 2005. Para la determinación del HPBW se considera las posiciones en el intervalo de amplitudes y la diferencia en el intervalo de tiempo en el lóbulo principal, luego encontrada la diferencia de tiempo a potencia media es dividida por la razón de desplazamiento mencionada.

La tabla 4.2 resume las características de las adquisiciones de los tránsitos de las fuentes como son: *amplitud máxima promedio, tiempo de tránsito, HPBW y el tamaño angular* de cada fuente. Hay un caso particular respecto al calculo del HPBW de Virgo A, las series de tiempo adquiridas no fueron las suficientes para deteminarlo, además de que su tránsito en tiempo real fue enmascarado por el interferencias del medio ó producidas por el propio sistema (amplificadores, receptor), por tanto no pudimos determinar dicho ancho del lóbulo principal.

Respecto a la amplitud máxima. Vemos en el caso de Cassiopea (0.5 V) y Cygnus A (0.65 V) un tiempo de tránsito de 10 a 13 minutos que, comparado con los tránsitos de Nebulosa del Cangrejo y Virgo A, es mucho mayor. Sin embargo, estos últimos tienen máximos en sus picos con amplitudes comparables con las dos primeras (Cassiopea y Cygnus A). Podemos entonces afirmar que el hecho de que las últimas fuentes transitaran durante la noche fue importante en haberlas podido observar puesto que el nivel de ruido es inferior al observado en el día 0.2 Volt (alrededor de 0.4 Volt menos que en el día), más no podemos afirmar que sea su tránsito característico por pocas series adquiridas en el caso de Virgo A.

	Cassiopea 3C461 AR= 23:23:28 Flujo: 13000 Jk	Cygnus A 3C405 AR= 19:59:28 Flujo: 8600 Jk	SOL	Nebulosa del Cangrejo 3C144 AR= 05:34:32 Flujo: 1500 Jk	Virgo A 3C274 AR= 12:30:50 Flujo: 1100 Jk
<i>AMPLITUD MÁXIMA PROMEDIO (V)</i>	0.50	0.65	1.10	0.69	0.61

TIEMPO DE tránsito (min)	10.00	13.00	9.50	2.30	2.5
HPBW (GRADOS)	1.5°	1.07°	1.27°	0.3°	-
TAMAÑO ANGULAR (arc. Min.)	13.0'	7.1'	-	6'x4'	7.0'

Tabla 4.2 Amplitud máxima y tiempo de tránsito, en promedio, de las fuentes detectadas durante el mes de enero de 2005.

Respecto a el HPBW cabe mencionar que se tomó como referencia el promedio que cada fuente registró en el mes de Enero, según la estimación teórica calculada para el patrón del lóbulo principal de 1° apuntando hacia el cenit del observatorio (**Calibration and testing of the MEXART antenna using solar transits, González A. et. al**), sólo Cygnus A (1.07°) se aproxima a dicha estimación de 1°, le sigue el sol con 1.27°, cabe mencionar sobre estos dos tránsitos no es confiable su determinación por promedio pues en los días 16, 17, 18 y 19 de Enero de 2005, ambos tránsitos coincidieron en tiempo real lo que provocó una saturación de señal en el receptor.

El Sol no aparece en el catálogo consultado (sección 3.3) porque dicho catálogo fue hecho con base en las observaciones de fuentes galácticas y extra galácticas y no por fuentes del sistema solar. Además, el sol es relativamente variable en su flujo a estas frecuencias y no tiene una posición definida en el cielo. El flujo considerado para el sol quieto es de 190,000 Jy (245 MHz) la unidad de flujo solar es = 10^4 Jy (**Learmonth IPS/US Air Force Patrol Telescope**). Con base en lo anterior no podemos confundir al sol con ninguna otra fuente, pero sí compararla con las demás con respecto a su amplitud, y considerarlo como referencia para calibrar con base en su HPBW las demás líneas.

Un aspecto importante a considerar respecto al tránsito solar es que de la figura 4.16 (**sierra, 2006**) la saturación del receptor 1 por tanto disminución de ganancia en el lóbulo principal, la intensidad característica se presentó también en nuestros resultados. Esto ya se había presentado en los registros de Julio de 2004 del tránsito solar. La iniciativa de los técnicos del MEXART de intercalar filtros de RF pasa alta entre los baluns y el primer amplificador de la primer sección además de poner un filtro pasa banda antes del segundo amplificador mejoró la calidad de la señal en las líneas de transmisión no permitiendo la suma de interferencias. Lo anterior se menciona porque entre las pruebas de calibración que se realizaron se encontraban las líneas 7, 9 y 11 que son de interés de este trabajo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron las observaciones realizadas en el MEXART a 140 MHz de las fuentes CASSIOPEA, CYGNUS A, EL SOL, NEBULOSA DEL CANGREJO Y VIRGO A; así como también una visión general de la infraestructura física y técnica del instrumento, el recorrido de la señal a través de la antena hasta su procesamiento digital. El trabajo tiene su justificación a que después de ser el sol la primera fuente observada en julio de 2004 se deseaba conocer si la calibración de las primeras antenas iba por buen camino tomando como referencia las fuentes arriba mencionadas.

Cabe mencionar que hasta la recopilación de los datos de las fuentes, los trabajos técnicos y de infraestructura en el radiotelescopio, eran los que están escritos en este trabajo. Por lo tanto hasta la actualidad han seguido evolucionado constantemente dichos trabajos en lo referente a calibraciones de las demás antenas, tiempos de observación con una o dos antenas sumadas a la entrada del receptor, etc.

Con base en las observaciones realizadas a 140 Mhz. en el radiotelescopio durante el mes de enero de 2005 podemos concluir lo siguiente:

1. El flujo de potencia característico para cada fuente está representado en el aspecto cuantitativo a través de sus series de tiempo, es decir, que mientras el flujo de Virgo A de 1100 Jy tiene una amplitud máxima de 0.61 Volt, y el flujo de Cygnus A de 8600 Jy tiene una amplitud máxima de 0.65 Volt.
2. La suma de señal de las antenas 7 y 9 (día 25), no aporta significativamente en la sensibilidad del instrumento, esto es el nivel mínimo de señal de RF que pueda detectarse. Un posible motivo es que hubo un problema en el receptor donde probablemente no se estén sumando bien las señales, ya que en sus respectivos bloques de amplificación responden casi de igual manera en la recepción y transporte de la señal hacia el cuarto de control. Otro posible motivo es que la señal de las antenas no estén llegando con una fase adecuada al receptor.
3. En el caso especial de la suma de las antenas 7 y 8 (día 31), el nivel de ruido baja significativamente y no se ve ninguna contribución importante de la antena 8 a la señal. Podemos afirmar que existe un problema de amplificación, alineación o de longitud estandarizados que establecen las características de construcción en el MEXART de cables en la antena 8.

4. La no correspondencia del promedio con los tránsitos del sol en el mes, se debe probablemente a la coincidencia en los primeros días del tránsito de Cygnus A, provocando una saturación del receptor, ya que irremediablemente la señal de Cygnus A fue también sumada a la del Sol cuando sacamos el promedio de este último en los primeros días de observación (días 16, 17 18 y 19). La posible manera de resolverlo es reduciendo el ancho de banda en el receptor y adicionando los filtros pasa banda en las secciones 1 y 2 de los amplificadores de cada línea.
5. De la coincidencia de tránsitos entre el Sol, y CygnusA podemos citar de esta última que en los días posteriores coincidió el promedio con dichos tránsitos, notándose una ligera variación de la amplitud debido a que la antena 9 presenta una mejor sensibilidad que la antena 7, pero dicha diferencia es muy ligera, del orden de 0.07 Volts.
6. En el caso de Cassiopea los tránsitos coincidieron con el promedio del mes, independientemente de la antena con que se adquirieron dichos registros. De la señal podemos ver que hay dos picos acompañando al máximo y que tienen un ligero desplazamiento conforme pasan los días de registro. Esto se debe tal vez a la estructura de Cassiopea y su variedad de flujo pueda influir en dichos registros y en su conjunto.
7. Para cuando se registraron las fuentes Virgo A y Nebulosa del Cangrejo, durante la noche, el nivel de ruido electromagnético era muy bajo debido a la disminución de la actividad humana, lo que permitió distinguir del ruido cotidiano al tránsito de dichas fuentes, siendo éstas de un flujo inferior a las demás registradas en este trabajo. Dicho nivel de amplitud del orden de 0.0 Volt, fue característico en esos días de observación en el mes de Enero de 2005.
8. Podemos mencionar que las antenas 7 y 9 se pueden tomar como referencia para la calibración de las otras antenas pendientes de trabajar en observaciones futuras, es decir, los registros de los sectores de amplificación, orientación de los dipolos y sensibilidad a los tránsitos de estas fuentes, pueden servir de referencia para trabajos con las demás antenas.
9. Sabemos que el MEXART funcionará como un arreglo de gran superficie recolectora, un componente básico en el instrumento como es la matriz de Butler nos ayudará a poder coleccionar más fuentes de mayor y menor intensidad cuando el

arreglo esté operando completamente. Las fuentes presentadas en este trabajo son sólo un indicativo para la calibración del MEXART.

Sobre el ancho a potencia media del lóbulo principal (HPBW) de las antenas 7, 9 y 11, ninguna antena está en simetría en su lóbulo principal respecto al cenit del observatorio previsto en 1° , pues tenemos en los tránsitos de las fuentes con valores de entre 1.5° en el caso de Cassiopea y 0.3° en el caso de Nebulosa del Cangrejo.

Bibliografía

1. Aguilar R. E., 2001, *Variaciones con el ciclo solar de las diversas manifestaciones de actividad solar*. Ciudad de México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría en Física Espacial, 131. México.
2. Altschuler M. D. & Newkirk G., 1969, *Solar physics.*, 9 (2), E.U.A.
3. Alukar S.K., 1989, **in** Bobra A.D., Nirman N.S., Venat P., et al. (ED), *Three-site solar wind observatory*. Indian Journal of Pure & Applied Physics, **27**, 322-330. India.
4. Ananthakrishnan S., Coles W.A. y Kaufman J.J., 1980, *Microturbulence in solar wind streams*. J. Geophys. Res. **85**, 6025. E.U.A.
5. Andrade M. Ernesto, **“Diseño y construcción del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario en Teolotucan Estado de México”**. Tesis de licenciatura. Director Dr. Américo G. UNAM, 2000, México.
6. Balanis C.A., 1982, *Antenna Theory - Analysis and Design*. John Wiley & Sons. E.U.A.
7. Butler J., and R. Lowe, **Beam-forming matrix simplifies design of electrically scanned antennas**, Electron. Design, vol. 9., April, 1961
8. Carrillo V. A., 2001, *Skylab*. Departamento de Física Espacial, Geofísica, UNAM. 1 (26) México.

9. Carrillo V. Armando, “**Construcción y Calibración del Radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART**”. Tesis de Doctorado en revisión. Instituto de Geofísica UNAM. Director Dr. Román P. Enríquez, 2007.
10. Casillas P. G., 2004, *Instalación y Configuración de la Tarjeta Adquisitora de datos RPC-320, para Realización de Pruebas de Calibración del MEXART*. Serie reportes internos 2005 –02, Instituto de Geofísica, UNAM. Julio de 2005, (15), México.
11. Chandrasekhar S. 1967, *An Introduction To The StudyOf Stellar Structure*. Dover Publications, Inc. E.U.A.
12. Coles, W. A. and Rickett, B. J. **Journal Geophysics**, Res. 83 4797, 1976.
13. Dressler A. J. **Solar Wind and Interplanetary Magnetic Fiel**. Reviews of Geophysics Vol. 5, February, 1967.
14. García J. Antonio, **Introducción a Radio astronomía**, UNAM, México D.F. 2001.
15. González E. A., 2000, *Introducción de Gran Escala del Medio Interplanetario*. Comunicación técnica, Instituto de Geofísica, UNAM. Junio 2000, (82), México.
16. González J.A. et. al., **Calibration and testing of the MEXART antenna using solar transits**, Advances in space research (a COSPAR publication), 13 October 2005.
17. Hewish, A. **Planetary Space**, Sc 35, 481, 1987.

18. Kraus J.D., ***Radio Astronomy***. McGraw-Hill. 1966, E.U.A.
19. Mendizabal C. U., **Una base de calibradores para el MEXART**. Ciudad de México, D.F., UNAM, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría, 2003, México.
20. Parker E. N., 1955, ***Astrophys. J.***, 23. E.U.A.
21. Priest E. R., **Solar Magnetohidrodinamics**. 1982,E.U.A.
22. Priest, E. R. **Dynamics and Structure of Quiescent Solar Prominences**, (ed) Kluwer Academic, Pub. P 3. 1988.
23. Ruthroff C.L., 1959, ***Some broad band transformers***. Proc. IRE., 1342. E.U.A.
24. Sierra Figueredo P., **Reporte de estancia en el MERXAT**. Instituto de Geofísica y Astronomía –CIMAT, Cuba. Noviembre 2006, México.
25. Shelton J.P., and Hasiao J.K., 1979, ***Reflective butler matrices***. IEEE Transactions on antennas and propagation, 27 (5). E.A.