



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO DEL ESPECTRÓMETRO CALLISTO-MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A:

PAZ MARTÍNEZ GAUDENCIO



Director de Tesis:
Dr. Alejandro Lara Sánchez

México, D.F.

Junio 2008

Dedicado a mi madre y a mi padre.

Agradecimientos

1. Al Dr. Alejandro Lara por guiarme y corregir los errores en el desarrollo de esta tesis.
2. Al Ing. Paulino Alonso Rivera, del Centro Nacional de Prevención de Desastres, por haber proporcionado los conectores N y armado el cable para la antena.
3. Al Sr. Filiberto Matias, por su valiosa ayuda en la construcción y pruebas de la antena.
4. Al M.C. Victor de La Luz Rodríguez por facilitar el analizador de espectros necesario para las pruebas de la antena.

Itaca

Cuando salgas para hacer el viaje hacia Itaca
has de rogar que sea largo el camino,
lleno de aventuras, lleno de conocimiento.
Has de rogar que sea largo el camino,
que sean muchas las madrugadas
que entrarás en un puerto que tus ojos ignoraban
que vayas a ciudades a aprender de los que saben.
Ten siempre en el corazón la idea de Itaca.
Has de llegar a ella, es tu destino
pero no fuerces nada la travesía.
Es preferible que dure muchos años
que seas viejo cuando fondees en la isla
rico de todo lo que habrás ganado haciendo el camino
sin esperar a que dé más riquezas
Itaca te ha dado el bello viaje
sin ella no habrías salido.
Y si la encuentras pobre, no es que Itaca
te haya engañado. Sabio como muy bien te has hecho
sabrás lo que significan las Itacas.

Itaca, poema de Constantinos Kavafis, Adaptación de Carles Ribas y Lluís Llach.

Índice general

Índice general	I
1 Resumen	1
1.1. Objetivo	2
2 Estructura Solar	3
2.1. El interior del Sol	3
2.1.1. Núcleo	3
2.1.2. Zona de radiación	5
2.1.3. Zona convectiva	7
2.2. La Atmósfera solar	7
2.2.1. La Fotosfera	7
2.2.2. La Cromosfera	8
2.2.3. La Corona	9
2.3. Actividad solar	10
3 Radio Emisiones del Sol	14
3.1. Radio Señales del Sol en calma	14
3.1.1. Radiación del cuerpo negro	14
3.1.2. Radio Brillo	16
3.1.3. El misterio de la temperatura solar	17
3.1.4. Nivel efectivo de radiación	18
3.2. Radio señales del Sol en actividad	19
3.2.1. La componente lentamente variable	19
3.2.2. Radioemisiones de un destello pequeño	21
3.2.3. La secuela de un gran destello	24
4 Receptores en radio astronomía	26
4.0.4. Receptor superheterodino	26

4.0.5. Detector	28
4.0.6. Integrador	29
5 Antena logarítmica Periódica	31
5.1. Conceptos básicos de antenas	31
5.1.1. Intensidad de radiación	31
5.1.2. Patrón de radiación	33
5.1.3. Directividad	35
5.1.4. Polarización	35
5.1.5. Ancho de banda	35
5.2. Arreglo logarítmico periódico de dipolos	37
5.2.1. Un procedimiento de diseño para una LPDA	40
5.2.2. Diseño de la antena LPDA para el espectrómetro CALLISTO	43
5.2.3. Simulación de la antena	44
5.2.4. Determinación del patrón de radiación	48
6 Espectrómetro CALLISTO	56
6.1. El concepto de CALLISTO	56
6.1.1. Hardware	57
6.1.2. Software	60
6.2. Primeras observaciones	63
7 Conclusiones	67
Bibliografía	68
A Diagramas del espectrómetro CALLISTO	69
B Archivos de configuración	75
C Microcontrolador de arquitectura RISC ATmega16	83
D Sintonizador CD1316	85
Lista de abreviaciones	86

Capítulo 1

Resumen

La actividad solar tiene gran influencia sobre la vida en la Tierra, hoy se habla de que el Sol puede afectar el clima en la Tierra, por ejemplo a través de la modulación de los rayos cósmicos, que son partículas cargadas que ionizan la atmósfera y que pueden ser nucleadores de nubes. Por otra parte las explosiones solares generan perturbaciones que afectan las comunicaciones en sistemas de celulares y en general todas las comunicaciones de radio ondas, pero no solo las comunicaciones se ven afectadas, los satélites dedicados a otros fines sufren también perturbaciones, por ejemplo el sistema GPS. Debido a la importancia de estos fenómenos se hace un gran número de estudios a nivel internacional para comprender la actividad solar, como parte de este esfuerzo se crean convenios de colaboración entre las instituciones que se dedican a dicho estudio. Un ejemplo de este tipo de colaboraciones es el Año Heliofísico Internacional, dentro de este marco el Instituto de Geofísica (IGEF) de la UNAM recibió un espectrómetro solar por parte del Instituto de Astronomía de Zurich, Suiza. El instrumento es adecuado para la observación de los estallidos solares que ocurren en la longitud de onda métrica y decimétrica. Aunque en el rango de frecuencias del instrumento ocurren al menos cinco tipos de estallidos solares, se pretende observar sobre todo los estallidos solares del tipo II y III. Este trabajo de tesis consistió en estudiar el principio de operación del instrumento para ponerlo en funcionamiento, además del diseño y construcción de una antena de banda ancha necesaria para la propia operación del instrumento. El Espectrómetro se encuentra en operación en el IGEF, pero debido a que en el intervalo de frecuencias de operación existe interferencia por el uso comercial del espectro radioeléctrico se planea instalar el instrumento en el volcán Sierra Negra localizado en el estado de Puebla, debido a la altitud

del sitio (4550 m) la interferencia es menor.

1.1. Objetivo

Desarrollar un radio espectrómetro para la observación de la radiación solar en longitudes de onda métricas, participando así en un sistema global de monitoreo del Sol durante las 24 horas del día. Al poner en operación el espectrómetro CALLISTO se adquirirán conocimientos para el desarrollo de radiotelescopios en general y particularmente instrumentos de bajo costo usando componentes electrónicos asequibles para Universidades de bajo presupuesto.

Capítulo 2

Estructura Solar

Los astrofísicos clasifican al Sol como una estrella de tamaño, brillo y temperatura promedio. La energía que emite el Sol es de 3.9×10^{26} watts y se espera que siga produciendo energía a esa tasa por los próximos 5 billones de años. El Sol tiene un diámetro de 1.4 millones de Kilómetros, aproximadamente 109 veces el diámetro de la Tierra, pero ésta afirmación es algo engañosa, porque el Sol no tiene "superficie", no hay nada duro, o definido sobre el disco solar que se pueda ver. Es más exacto pensar que el límite del Sol se extiende, inclusive más allá de la tierra. Para el estudio de la estructura del Sol, los físicos solares lo dividen en dos partes principales: El interior y la atmósfera solar.

2.1. El interior del Sol

El interior del Sol se divide en tres regiones que deben su nombre al mecanismo predominante de transporte de energía:

- Núcleo
- Zona de radiación
- Zona convectiva

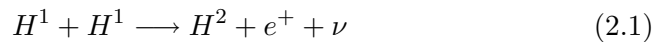
2.1.1. Núcleo

El núcleo del Sol se extiende hasta $0.25R_{\odot}$ *, se encuentra a una temperatura de aproximadamente 15,000,000 K y una densidad de $1.6 \times 10^5 \frac{Kg}{m^3}$.

* R_{\odot} es el radio solar, equivalente a unos 0.7 millones de Kilómetros

La presión es cerca de mil millones de atmósferas terrestres, en estas condiciones, son frecuentes las colisiones entre átomos y los núcleos se encuentran desprovistos de sus capas de electrones. Estas circunstancias favorecen la producción de reacciones nucleares, cuando éstos núcleos desnudos se aplastan entre sí a alta velocidad. La energía solar es producida por la conversión de Hidrógeno en Helio, en lo que se conoce como una *reacción por fusión*. La transformación básica implica la combinación de cuatro núcleos de hidrógeno o protones para formar un solo núcleo de Helio. El núcleo de Helio He^4 pesa $4.7 \times 10^{-26} g$ menos que el peso combinado de los cuatro protones originales, esta materia perdida reaparece como energía, $36.7 MeV \approx 4.283 \times 10^{-5} erg$ se producen por cada núcleo de Helio formado.

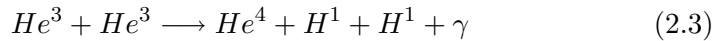
Debido a que es extremadamente improbable que cuatro protones choquen simultáneamente, el proceso para la formación de un núcleo de Helio He^4 es producto de una cadena de sucesos. Por las condiciones existentes en el interior del Sol, es la llamada *reacción protón-protón* la que genera probablemente la mayor parte de la energía. El proceso ocurre de la siguiente manera, dos protones H^1 colisionan y se produce un núcleo de Hidrógeno pesado H^2 , además de este núcleo se forma un positrón e^+ y un neutrino ν . El proceso se puede expresar mediante una ecuación de la siguiente manera.



El núcleo H^2 choca con otro protón y se forma un isótopo ligero de Helio y un rayo gama:



Finalmente es necesaria una última reacción, los núcleos He^3 recién creados colisionan para producir un núcleo de Helio ordinario, más dos protones y un rayo gama.



Seis protones participaron en la creación de dos núcleos He^3 , al final se recuperan dos protones, así se cumple la transmutación deseada de $4H^1 \longrightarrow He^4$. Las ecuaciones 2.2 y 2.3 muestran la aparición de energía radiante en forma de fotones gama. El positrón de la ecuación 2.1 es un antielectrón que es rápidamente atraído por un electrón negativo ordinario aniquilandose entre sí, como lo muestra la ecuación 2.4



De esta manera se libera más energía en forma de radiación gama. Por cada núcleo de He^4 que se forma se emite un total de siete fotones de rayo gama, ya que el proceso de las ecuaciones 2.1 y 2.2 se produce dos veces en la

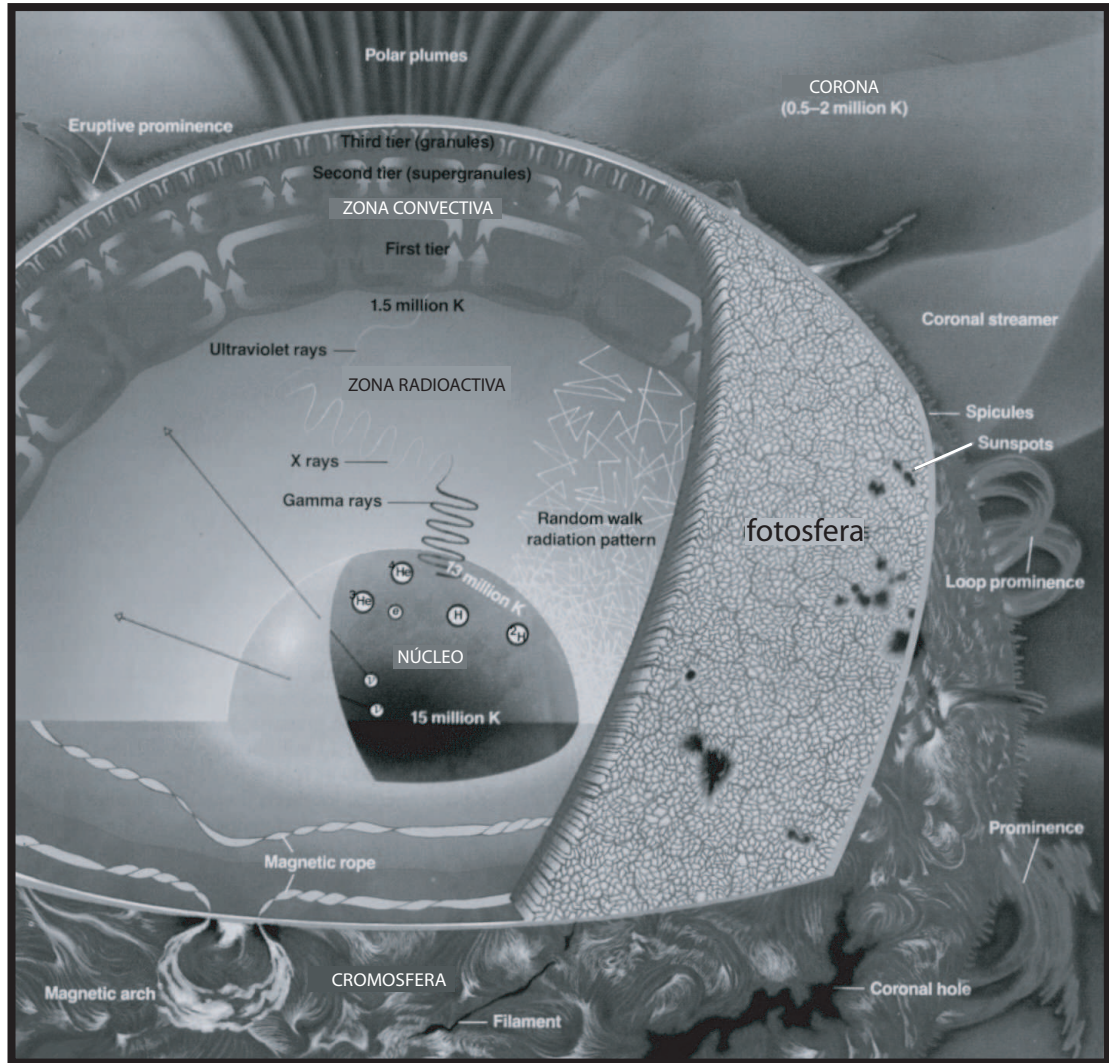


Figura 2.1: Estrura del Sol.

formación de un solo núcleo. En la figura 2.2 se muestra gráficamente los pasos necesarios para la formación de un núcleo de He^4 .

En resumen, el núcleo es entonces un enorme horno nuclear, cuyo combustible es el hidrógeno a temperatura y presión enormes. Al consumirse este combustible, la energía fluye hacia afuera en forma de radiación gama, y el Helio es la "ceniza" que queda atrás como resultado de esta reacción.

2.1.2. Zona de radiación

Los fotones de rayos γ producidos por fusión en el núcleo entran en la llamada *zona de radiación*, es una región que rodea el núcleo y se extiende

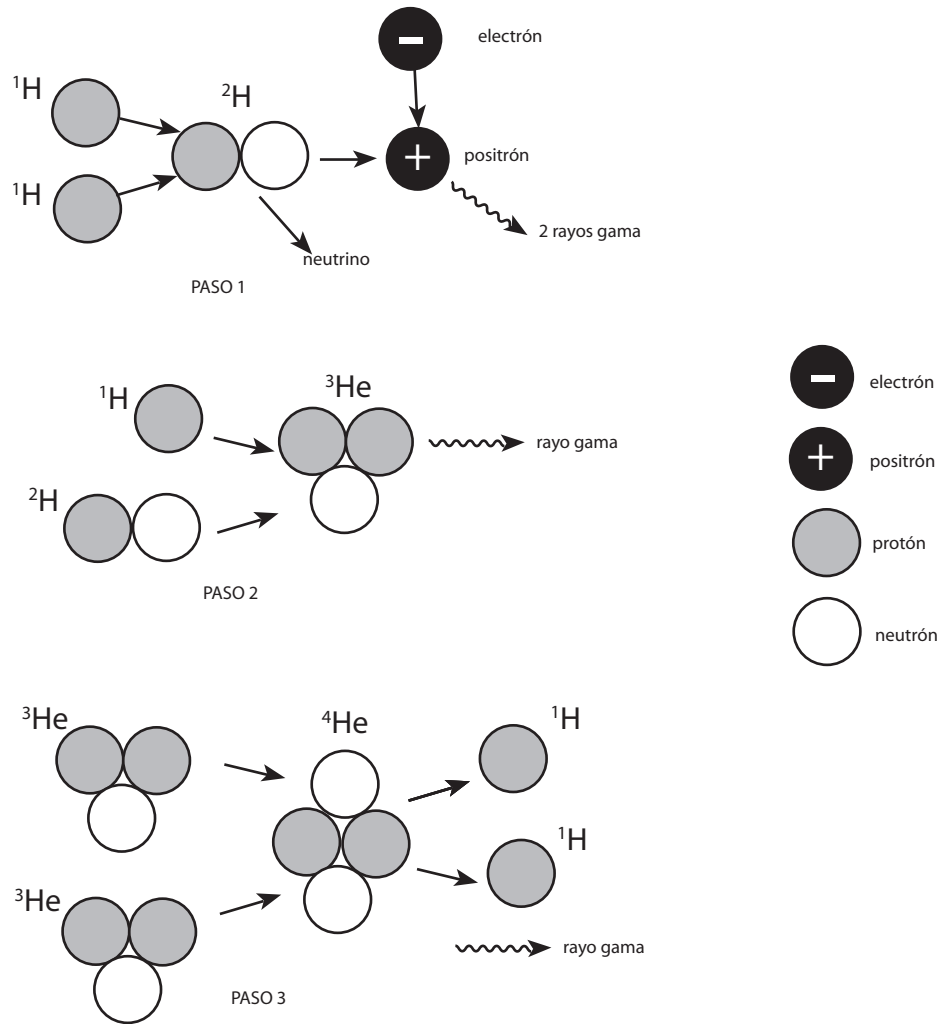


Figura 2.2: Proceso seguido para la formación de un núcleo de Helio, debido a que se necesitan dos núcleos He^3 para formar el núcleo He^4 , los paso 1 y 2 se llevan a cabo dos veces.

hasta $0.86R_{\odot}$, tiene un efecto de aislante que ayuda a mantener la alta temperatura del núcleo. El transporte de energía en esta región se realiza en forma de radiación. Los fotones gama en esta zona son absorbidos y emitidos repetidamente a medida que encuentran átomos innumerables en su viaje hacia la superficie del Sol, en estos encuentros su energía se va degradando gradualmente, primero en la región de rayos X del espectro, y después en el ultravioleta, esto se ilustra en la figura 2.1.

2.1.3. Zona convectiva

Por encima de la zona de radiación, se encuentra la llamada *zona convectiva*, en esta zona, la temperatura es menor y el transporte de energía por radiación es menos significativo, la energía es transportada hacia el exterior principalmente por convección. El material más caliente de la región baja de esta zona asciende, al mismo tiempo el material más frío de la parte superior desciende y gigantescas celdas convectivas son formadas (ver figura 2.1). El tope de la células convectivas puede ser vista en la *fotosfera* como gránulos. La circulación convectiva de plasma** genera grandes campos magnéticos, estos juegan un papel importante en la formación de manchas solares y estallidos solares.

2.2. La Atmósfera solar

La atmósfera solar se divide en tres partes.

- Fotosfera
- Cromosfera
- Corona

2.2.1. La Fotosfera

Es la superficie visible del Sol, la que vemos a simple vista, emite la mayor parte de la radiación visible e infrarroja. El método predominante de transferencia de energía es por radiación. La fotosfera es una capa de transición en la que la presión del gas y la densidad disminuyen muy rápidamente con el aumento de la altura. En el fondo de la fotosfera el gas es opaco a la luz visible, pero cerca de la parte superior es de gran transparencia. El espesor total de la fotosfera es de casi 400 Km, es una de las capas más frías del

**El plasma es un gas compuesto de iones positivos libres y electrones libres, con una misma densidad de tal forma que el gas es neutro a gran escala.

Sol, su temperatura es de unos 6000 K . Incluso los niveles más bajos de la fotosfera son mucho menos densos que la atmósfera de la tierra al nivel del mar, se cree que la opacidad de esta parte se debe a la presencia de grandes cantidades de iones negativos de Hidrógeno, H^- , que son poderosos absorbentes de luz.

Con un telescopio simple pueden ser observadas varias características de la fotosfera, como la superficie granulada, manchas solares y fáculas brillantes, la figura 2.3 muestra un acercamiento a una mancha solar rodeada por la superficie granulada. Los gránulos característicos del Sol son pequeñas ($\approx 1000\text{ Km}$) estructuras celulares que cubren todo el Sol, excepto las áreas con manchas solares. Un gránulo brillante cualquiera dura solamente algunos minutos, y se cree que representa un surtidor de material caliente que ha sido llevado a la superficie por convección. Las fajas que separan los gránulos se cree que están formadas por gas que se ha enfriado y se está hundiendo hacia el fondo de ésta turbulenta capa.

2.2.2. La Cromosfera

La Cromosfera o "*esfera de color*" se encuentra situada justo arriba de la fotosfera. Es muy tenue y presenta un color rojizo cuando se hace visible durante unos segundos al principio y final de un eclipse de Sol. Es una capa irregular, posee un intervalo de temperatura que va de 4200 K a 25000 K y su espesor es de unos 2000 Km . La cromosfera exhibe un espectro de emisión de línea brillante, que indica que está compuesto de gas incandescente a baja presión. La capa debe su color rojizo al brillo de una de estas líneas de emisión, la línea $H\alpha$ de hidrógeno en una longitud de onda de 6563 \AA . La cromosfera es un mar borboteante de actividad. Su superficie también tiene patrones celulares, pero estas células son más grandes que los gránulos de la fotosfera. Cerca de las fronteras de estas células se concentran campos magnéticos en los que aparentemente hay expulsión vertical de material, llamadas *espículas*. La vida de las espículas se mide en minutos, muchas de las espículas aparecen, primero cerca de la base de la cromosfera y después, siguen rápidamente su camino hacia arriba hasta que estallan en la corona inferior. Puesto que no hay evidencia de que este material en corriente ascendente vuelva a caer a la atmósfera inferior, se ha pensado que las espículas proveen constantemente a la corona de nuevo material para reemplazar el gas que fluye al espacio como viento solar. El método de transferencia de energía en esta capa es hidrodinámica: ondas acústicas y magneto acústicas principalmente.

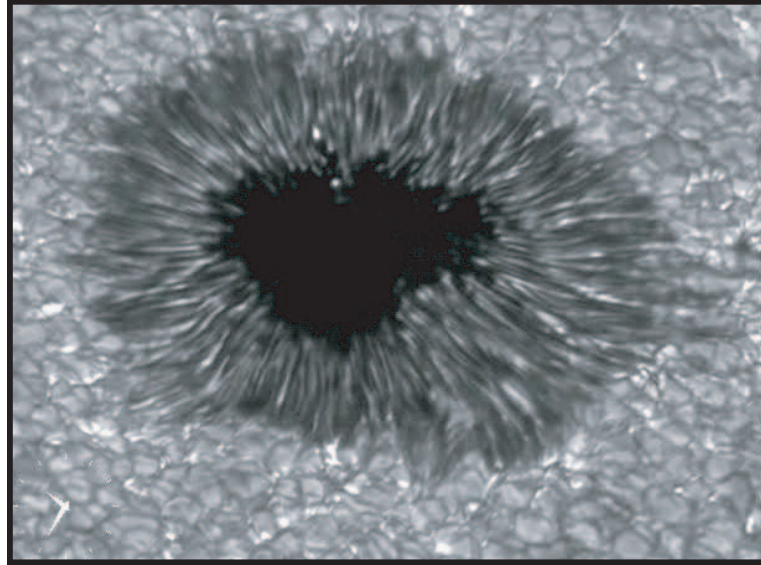


Figura 2.3: Superficie de la fotosfera, en ella se puede observar los gránulos característicos, se observa también una mancha solar y su borde.

2.2.3. La Corona

Durante un eclipse total, la fotosfera, primero y después la cromosfera quedan completamente ocultas, se ve un débil halo blanco alrededor del Sol, en la figura 2.4 puede observarse este halo, y se le conoce con el nombre de *Corona*, es la región más caliente de la atmósfera del Sol y se encuentra al alcance de los instrumentos de investigación solar, su temperatura es muy alta, cercana a los $2,000,000 K$ y la causa de tan alta temperatura no ha sido completamente entendido todavía. Sea cual sea el mecanismo que la calienta, la corona tiene que aproximarse a un plasma puro. La Corona muestra una variedad de características morfológicas: cascos coronales (Helmet Streamer), hoyos coronales, plumas polares (polar plumes), arcos (Loops).

Los cascos coronales (en la figura 2.4 se muestra gráficamente un casco coronal) son grandes estructuras con forma de gorro puntiagudo, asociadas a zonas activas y manchas solares. Se forman a partir de una red de líneas de campo magnético en forma de bucle que conectan las manchas solares, y que mantienen suspendido el gas cargado eléctricamente por encima de la superficie solar. La forma puntiaguda que poseen, se debe a la acción del viento solar que se expande entre los cascos coronales.

Los hoyos coronales son regiones donde la corona es oscura, están asociados con las líneas de campo magnético abierto, a menudo se encuentran en los polos en donde las líneas de campo magnético están abiertas, observaciones

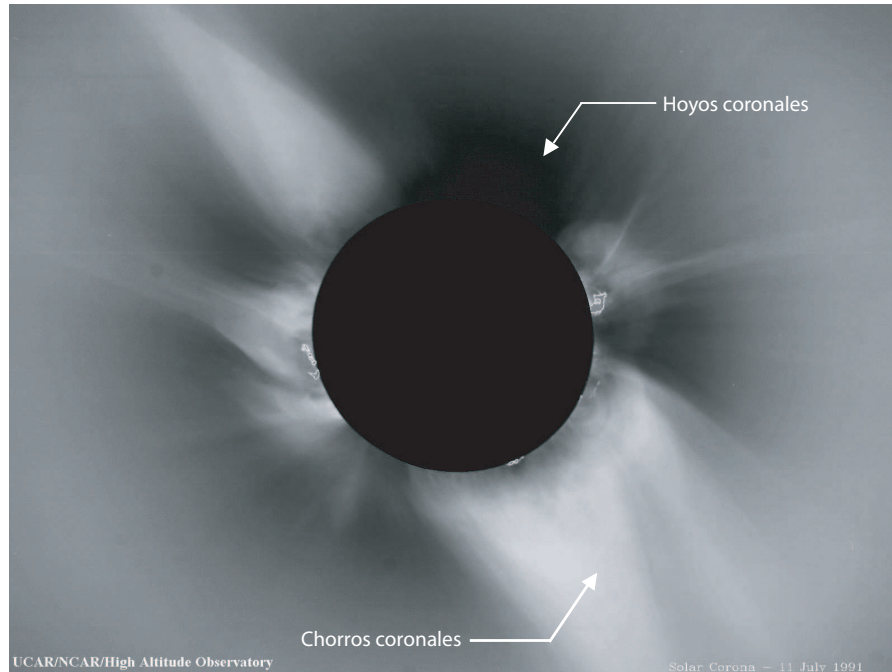


Figura 2.4: La corona durante el eclipse total del 11 de Julio de 1991, se observan facilmente los agujeros coronales y los chorros coronales

recientes establecen que son la fuente de chorros de alta velocidad de viento solar y, posiblemente el origen de éste. Los agujeros coronales se mantienen durante varias rotaciones solares y son las estructuras solares con mayor vida media. En la figura 2.4 se observan los agujeros coronales.

Las plumas solares son chorros largos y delgados (ver figura 2.1) de material emitido al exterior en los polos solares, son producidos por la acción del viento solar.

Los bucles o arcos coronales, se observan sobre las manchas solares y en las zonas activas, están asociadas a las líneas de campo magnético que conectan distintas zonas de la superficie solar. Varian rápidamente, pero algunos pueden durar días o semanas. Otros bucles, que están asociados a explosiones son visibles durante un período mucho más corto de tiempo. El material contenido en ellos es más denso que el que los rodea y pueden alcanzar los $700,000\text{Km}$ de largo, y una temperatura de dos a tres millones de grados Kelvin.

2.3. Actividad solar

El Sol experimenta un complejo ciclo de actividad de 11 años, que virtualmente afecta a todos los fenómenos observados, los cambios asociados a esta

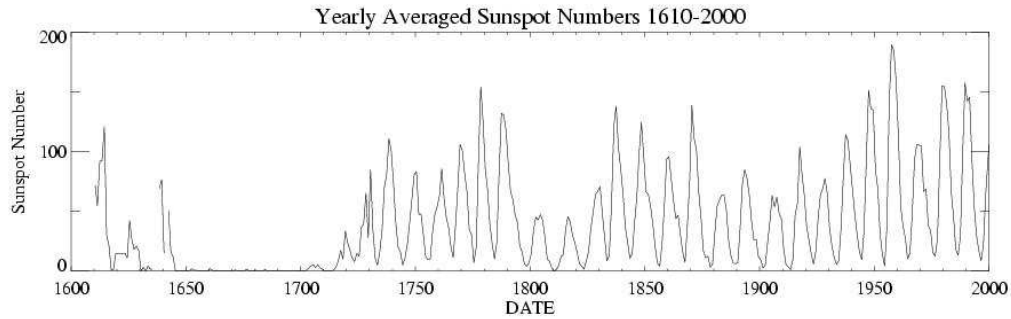


Figura 2.5: Número medio de manchas por año.

actividad afectan no solo al Sol, sino también a la Tierra.

Manchas solares. Las manchas solares varían en tamaño, hay algunas que poseen un tamaño minúsculo, apenas visibles con un gran telescopio, otras sin embargo son enormes, de 40000 o más Kilometros de diámetro. Hay manchas que duran menos de un día, otras duran varias rotaciones del Sol, el tiempo promedio de vida es de 3 o 4 días. La figura 2.3 es una fotografía de una mancha solar típica, se ve el núcleo oscuro o *umbra* y el borde menos oscuro que lo circunda, conocido también como *penumbra*. La mancha aparece como una depresión profunda en la fotosfera. En un espectrógrafo los corrimientos doppler de las líneas espectrales muestran que los gases fluyen radialmente hacia afuera desde el centro de la mancha. Las teorías sobre su origen, dicen que los gases brotan desde debajo de la superficie solar al centro de la mancha y desde ahí se esparcen hacia afuera. Al subir las moléculas de gas, adquieren energía potencial a costa de su energía cinética original y como consecuencia el gas se enfría. La mancha es más fría que la fotosfera circundante, su temperatura es $1500K$ menos que esta. Por ser más fría radia solamente una fracción de la luz irradiada por el resto de la superficie solar, por consiguiente se ve oscura.

Desde épocas remotas se han observado manchas a simple vista, pero, las fluctuaciones en el número de manchas fueron detectadas con las primeras observaciones con telescopios, y la naturaleza periódica de la variación fue encontrada hasta 1843 por el alemán Heinrich Schawabe, a tal periodicidad se le llamó *ciclo de las manchas solares*, el período es de 11 años. La figura 2.5, es una gráfica del número medio anual de manchas solares.

Fáculas y Flóculos. Las manchas solares son los fenómenos más visibles de cambios radicales en el Sol, se forman en áreas perturbadas del Sol conocidas como *regiones activas*. El nacimiento de una región activa se caracteriza por la aparición de placas brillantes en la fotosfera y en la cromosfera antes de que sea visible una mancha. Las fáculas son manchas brillantes en la

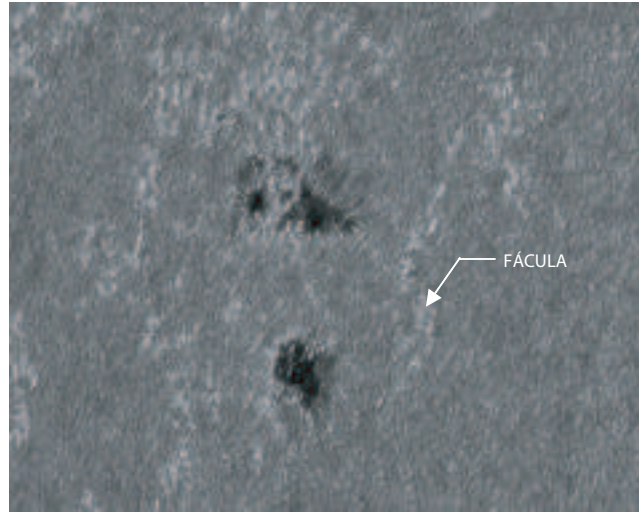


Figura 2.6: Fácua en la fotosfera solar

fotosfera (2.6), se pueden ver con luz blanca con un telescopio ordinario, su temperatura y densidad es mayor que su entorno. se suelen observar cerca del borde del disco solar.

Los flóculos son fulguraciones cromosféricas superficiales, captadas solamente en luz monocromática.

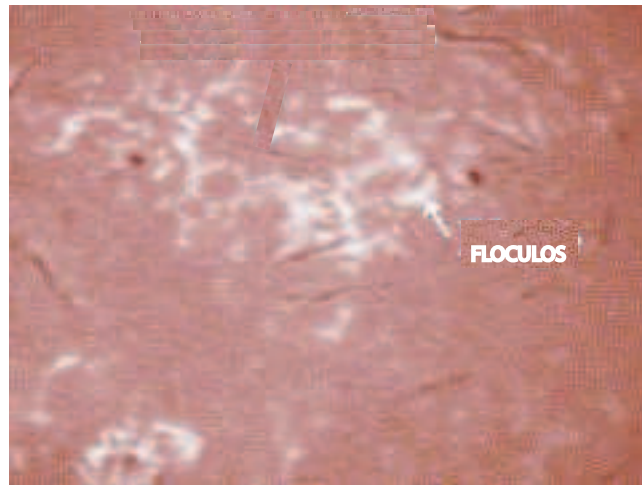


Figura 2.7: Flóculo cromosférico

Capítulo 3

Radio Emisiones del Sol

3.1. Radio Señales del Sol en calma

3.1.1. Radiación del cuerpo negro

La emisión de radio del Sol en calma es de origen térmico, para la explicación de esta radiación se recurre a la idealización conocida como *cuerpo negro*. Un cuerpo negro es un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él, no reflejándose ninguna fracción de ella. De acuerdo a la *ley de Kirchhoff*, un objeto que es buen absorbente es también un buen emisor, por lo tanto el cuerpo negro es el más eficaz radiador térmico. Aplicando la teoría de Planck a un cuerpo negro se obtiene una descripción exacta de la distribución de energía según la longitud de onda.

En la figura 3.1 la línea continua es la curva de radiación que predice la teoría de Plank para un cuerpo negro a una temperatura de $6000K$, posee un máximo en la parte visible del espectro y decae lenta y asintóticamente hacia longitudes de onda más largas. La curva de radiación del Sol aparece en la misma figura con una línea de trazos. Es de sorprender la coincidencia de ambas curvas a $6000K$ ya que la radiación solar viene de una espesa capa que abarca un amplio margen de temperaturas.

Si sube la temperatura del cuerpo negro, la curva crece en altura en todas partes y el pico se desvía hacia longitudes de onda más cortas; por otro lado si la temperatura disminuye, decrecen las ordenadas en la figura 3.1 y el pico se mueve hacia la derecha. La *Ley de Wien* correlaciona la temperatura absoluta T y la longitud de onda del pico λ_m mediante la expresión de la ecuación 3.1

$$\lambda_m T = 2,987 \quad (3.1)$$

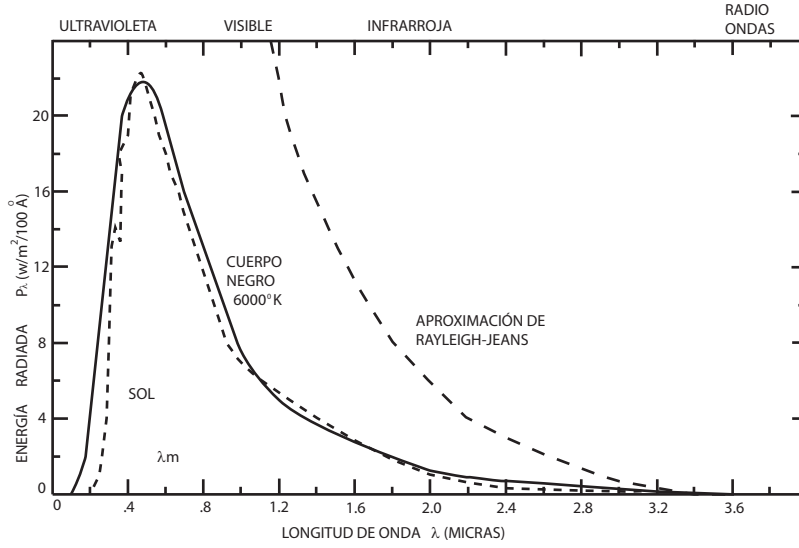


Figura 3.1: Curvas de radiación del Sol y de un cuerpo negro

La ecuación 3.2 es la llamada ecuación de Planck, debido a que es muy embarazosa para propósitos de cómputo, los radioastrónomos usan la ecuación 3.3 conocida como la *ley Rayleigh-Jeans*, que da casi los mismos resultados en las longitudes de onda más largas.

$$P_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (3.2)$$

$$P_\lambda = \frac{2\pi kT}{\lambda^2} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \quad (3.3)$$

En la ecuación 3.3 P_λ es la potencia emitida por metro cuadrado de superficie de un cuerpo negro cuya temperatura es T , medida sobre una banda de frecuencia de 1 Hz centrada en la longitud de onda λ , la expresión muestra que en la zona de radiofrecuencias P_λ es proporcional al cuadrado inverso de la longitud de onda. La ecuación 3.3 se refiere a la potencia por unidad de área emitida en la superficie del Sol, cuando la radiación solar llega a la Tierra ha sido atenuada por un factor $(\frac{R_0}{d})^2$, donde R_0 es el radio del Sol y d la distancia del Sol a la tierra. La densidad de flujo (energía recibida por unidad de área) está dada por la ecuación 3.4, si se mide S puede encontrarse la temperatura T de la fuente.

$$S = \frac{2\pi kT}{\lambda^2} \left(\frac{R_0}{d}\right)^2 \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \quad (3.4)$$

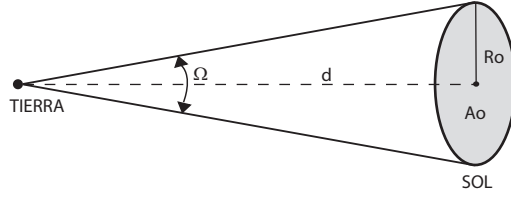


Figura 3.2: Geometría del ángulo sólido subtendido por el Sol.

3.1.2. Radio Brillo

Con objeto de tratar con fuentes extensas que se resuelven con instrumentos, en radioastronomía se usa la idea de *brillo* b , que se define como densidad de flujo por unidad de ángulo sólido. Haciendo uso de la ecuación 3.4, definimos el brillo de la siguiente manera:

$$b = \left(\frac{S}{\Omega} \right) \text{Vm}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{str}^{-1*} \quad (3.5)$$

Si el objeto es resuelto, el ángulo sólido desde el que se recibe el flujo puede determinarse por el ancho de haz del radiotelescopio.

El concepto de brillo puede extenderse a un objeto sin resolver, pero se debe tener un conocimiento previo de su tamaño angular porque Ω se define por la fuente y no por el instrumento de observación. En la figura 3.2 si A_0 es el área transversal del Sol, entonces partiendo de la definición de ángulo poliedro, $\Omega = \frac{A_0}{d^2} = \frac{\pi R_0^2}{d^2}$ estereorradianes. De las ecuaciones 3.4 y 3.5 se obtiene la ecuación:

$$b = \frac{2kT}{\lambda^2} \text{Vm}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{str}^{-1} \quad (3.6)$$

Si se logra medir b se puede utilizar la ecuación 3.5 para calcular la temperatura correspondiente de la fuente bajo la presunción de que se está tratando con radiación de un cuerpo negro. La temperatura calculada de esta manera se le llama *temperatura de brillo*, T_b .

$$T_b = \frac{b\lambda^2}{2k} \text{K} \quad (3.7)$$

En astronomía se utiliza el concepto de temperatura de brillo sin saber si la fuente se comporta como un cuerpo negro. Cuando se dice que una fuente tiene una temperatura de brillo de 20000K en determinada longitud de onda, lo que se dice es que su brillo es el mismo que si se estuviese observando la superficie de un cuerpo negro a esa temperatura.

*La unidad de ángulo sólido es el estereorradián y se abrevia str.

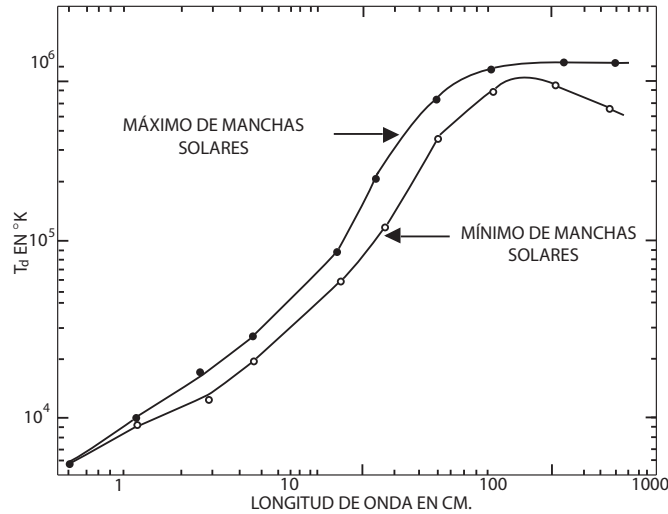


Figura 3.3: Temperatura aparente del Sol en varias longitudes de radioondas.

3.1.3. El misterio de la temperatura solar

La primera medición de la temperatura del Sol en la longitud de onda de 30.2 cm . arrojó un resultado de $20000K$, más de tres veces la cifra de $6000K$ que los astrónomos ópticos habían establecido para la fotosfera. El misterio de la discrepancia entre las temperaturas fue resuelto en 1946 por el trabajo del Australiano D. F. Martyn y del ruso V. L. Ginzburg, ellos demostraron que las ondas de radio de distintas frecuencias se originan en diferentes niveles de la atmósfera profunda del Sol. La temperatura de $20000K$ medida no provenía de la fotosfera, sino de la cromosfera que es mucho más caliente. Cuando se explora el Sol en longitudes de onda creciente las señales deben provenir de alturas más y más grandes de la atmósfera solar. La temperatura de las capas atmosféricas aumenta con la altura, entonces se ve un Sol que progresivamente se hace más caliente a medida que aumenta la longitud de onda de observación.

En la figura 3.3 se ve el cambio de temperatura medida del Sol a través del espectro. En longitudes de onda milimétricas T_d es muy cercana a los $6000K$ de la fotosfera. En el intervalo de centímetros, T_d asciende a valores típicos de la cromosfera, en longitudes de onda de metros las señales provienen de regiones cuya temperatura es un millón de grados, valor típico de la corona. Variando la longitud de onda de operación de un radiotelescopio, se puede hacer un análisis capa por capa de la atmósfera solar.

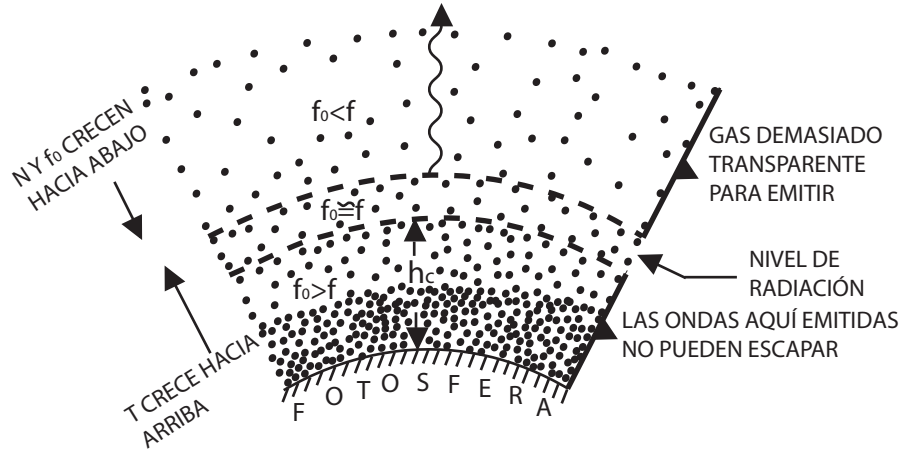


Figura 3.4: Nivel efectivo de radiación en la atmósfera solar, N es la densidad electrónica local, f_0 la frecuencia crítica local y f la frecuencia de observación.

3.1.4. Nivel efectivo de radiación

Las ondas de radio solares de una frecuencia dada f se originan casi enteramente en una delgada capa de gas a una altura h_c definida por encima de la fotosfera. El hecho de que se origina poca radiación en las regiones relativamente delgadas y transparente más arriba de h_c (ver figura 3.4), se explica mediante la ley de Kirchhoff. Un cuerpo puede ser un buen radiador sólo si es también un buen absorbente, las regiones exteriores del Sol son transparentes a las ondas de radio de frecuencia f , y radia débilmente en tal frecuencia. Entonces, el nivel efectivo de radiación h_c es la altura a la que el gas solar se hace lo bastante opaco para actuar como un radiador efectivo.

h_c es determinado por la forma en que varía la opacidad del gas solar con la altura. Cuando la radiación pasa por un medio absorbente homogéneo se atenúa de acuerdo a la ley de Bouguer de la ecuación 3.8, donde I_0 es la intensidad inicial de radiación e I es la intensidad después de recorrer la distancia s . El término k es el *coeficiente de absorción* del medio.

$$I = I_0 e^{-ks} \quad (3.8)$$

En un plasma como el gas solar, el coeficiente de absorción para una onda de radio de frecuencia f lo da la ecuación 3.9, donde γ es el número promedio de colisiones que un electrón experimenta en el gas cada segundo, c la velocidad de la luz, y f_0 es la frecuencia crítica para el plasma.

La frecuencia crítica f_0 para la cual las ondas de frecuencia más elevadas atraviesan fácilmente las capas ionizadas la da la ecuación 3.10, en esta expresión N es la densidad de electrones, e la carga del electrón, y m su

masa en gramos.

$$k \cong \frac{\gamma}{c} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$f_0 = c \sqrt{\frac{N}{\pi m}} \text{ Hz} \quad (3.10)$$

Regresando a la expresión 3.9, se espera que k varíe con la altura de la atmósfera solar, la ecuación 3.10 indica que f_0^2 es proporcional a la densidad electrónica local N , la cual aumenta de arriba hacia abajo, de las regiones menos densas a las más densas. Por consiguiente si se comienza arriba, en la corona, a descender hacia la fotosfera se tropieza con una frecuencia crítica constantemente creciente. Por la ecuación 3.9 mientras f_0 sea mucho menor que la frecuencia de onda f , el factor $\left(\frac{f_0}{f}\right)^2$ mantendrá pequeña la absorción, pero cuando f_0 se acerca a f , k se incrementa dando como resultado una fuerte absorción. El nivel efectivo de radiación coincide con la altura en que la frecuencia crítica es aproximadamente igual a la frecuencia de radiación f de interés. Puesto que f_0 aumenta hacia abajo (de la corona hacia la fotosfera), el nivel de radiación desciende cuando se hacen observaciones a frecuencias más y más elevadas. La consecuencia de lo anterior es que se genera poca energía de frecuencia f por encima de h_c , porque las ondas tienen que escapar a través de una región en donde su frecuencia es menor que la frecuencia crítica.

La atmósfera solar en calma es un plasma térmico que transmite ondas de radio en forma constante, la creación de ondas térmicas de radio en el nivel de radiación depende de un proceso que se conoce en la mecánica cuántica como *transición libre-libre*. El electrón que pasa cerca de un ion positivo sufre una fuerte atracción eléctrica que lo acelera en una órbita hiperbólica en torno al ion. El electrón escapa, pero durante el breve instante de aceleración emite una descarga de energía de radio.

3.2. Radio señales del Sol en actividad

3.2.1. La componente lentamente variable

La medición continua de radio emisión solar muestra que hay una variación lenta en el flujo diario sobre el fondo constante de la radiación térmica, esto es por encima de una longitud de onda de 1cm , la variación lenta muestra una periodicidad correspondiente a una rotación solar, por eso se le conoce como *componente lentamente variable*. abreviado simplemente como *componente s*. En la figura 3.5 se muestra el comportamiento de este fenómeno,

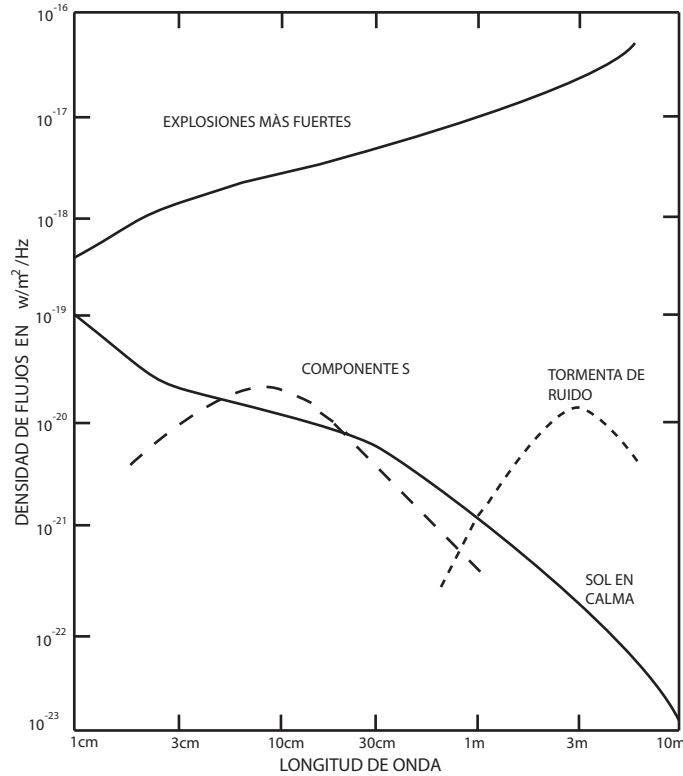


Figura 3.5: Densidad de flujo en radio recibido a causa de varias componentes del Sol en actividad.

por encima de $\lambda = 1\text{cm}$ comienza a crecer en intensidad, en la región decimétrica, entre los 10 y 50 cm es muy evidente, muestra un máximo cerca de 10cm y desaparece en el intervalo métrico. Hay un estrecho sincronismo entre el aumento y disminución de su intensidad con el número de manchas solares, más exactamente con los flóculos cromosféricos que se forman sobre manchas solares activas. Al comparar las regiones de emisión intensa con fotografías tomadas con luz monocromática se encontró una coincidencia con las regiones donde existen los flóculos ópticos, por eso a las fuentes del componente S se les a dado el nombre de *radio flóculos*.

Se ha supuesto que la componente lentamente variable es simple radiación térmica, generada por transiciones libre-libre de electrones, pero el flujo térmico decrece al aumentar la longitud de onda, en contraste, el máximo del componente S en $\lambda = 10\text{cm}$ no concuerda con este comportamiento. Hay teorías que indican que el máximo inusual se debe a *emisión giromagnética* de electrones acelerados en los fuertes campos magnéticos que atraviesan las regiones activas. La radiación térmica es resultado de movimientos al *azar* de partículas, en contraste, una emisión no térmica se produce cuando algún agente como un campo magnético pone *orden* al movimiento de

los electrones. Un electrón inyectado en un campo magnético en cualquier ángulo diferente de 0^0 o 180^0 , es forzado a describir espirales en torno de las líneas del campo. La frecuencia f_H con la que el electrón circunda las líneas de campo está dada por la ecuación 3.11. B es el campo magnético en Gauss.

$$f_H = \frac{B_e}{2\pi mc} \text{ MHz} \quad (3.11)$$

Sustituyendo las constantes (e, m y c) en la expresión se obtiene una ecuación simplificada:

$$f_H = 2.8B \text{ MHz} \quad (3.12)$$

El electrón que es acelerado constantemente radía, y lo hace en la frecuencia de giro. La energía electromagnética resultante es llamada *radiación ciclotrónica*. Debido a que la frecuencia de giro f_H tropieza con regiones donde el coeficiente de absorción es muy grande, no puede escapar, pero cuando la velocidad del electrón es una fracción apreciable de la velocidad de la luz (intervalo *relativista*), radía no sólo en la frecuencia fundamental de giro, sino también lo hace en frecuencias armónicas de f_H . Ya que los armónicos son de frecuencia mayor a la fundamental logran escapar de la atmósfera solar.

Otro mecanismo importante de emisión es la llamada *radiación sincrotrónica*, es de gran importancia pues los astrónomos le atribuyen mucha de la energía que llega a la tierra desde una gran diversidad de fuentes celestes. Al estudiar la radiación ciclotrónica se vió que un electrón entra en un campo magnético con una velocidad de orden relativista y emite, aparte de la frecuencia de giro f_H armónicos de la frecuencia de giro. Cuanto más cercana es la velocidad del electrón a la de la luz, las armónicas se vuelven numerosas y más importantes, hasta que virtualmente desaparece la fundamental f_H , y toda la radiación es concentrada en un número muy grande de armónicas, muy próximas unas a otras que se absorben unas a otras y forman un amplio continuo, y al ocurrir esto es completa la transición de emisión ciclotrónica ordinaria a radiación sincrotrónica. Una propiedad característica de la radiación sincrotrónica es que casi toda la energía es emitida en un cono angosto que se abre en la dirección hacia la que está viajando el electrón. En la figura 3.6 se muestra un electrón que gira en círculo alrededor del campo magnético, su emisión está confinada en un disco plano perpendicular al campo magnético.

3.2.2. Radioemisiones de un destello pequeño

La primera evidencia de que va a ocurrir un destello es un aumento en la emisión de microondas en una pequeña región de un radio flóculo, en muchas ocasiones el evento no alcanza una fase explosiva y el flujo de radio

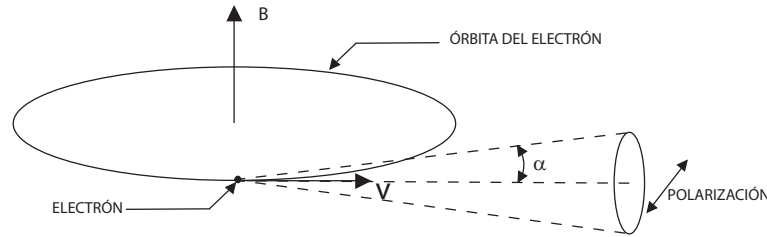


Figura 3.6: Cono de emisión sincrotrónica de un electrón de masa m y energía E , v es la velocidad instantánea del electrón.

desciende suavemente a su nivel original. Este evento conocido como *elevación y descenso gradual*, es motivo de investigaciones para comprender su origen, se cree que el fenómeno es resultado de una cotracción rápida de un campo magnético local. El plasma contenido en el campo es calentado por la compresión, y la radiación es debida a transiciones libre-libre de electrones de un *horno magnético* temporal.

En ocasiones, el mecanismo que produce la elevación y descenso gradual se torna de súbito altamente inestable y se siguen los acontecimientos explosivos que caracterizan un destello solar. La primera etapa, llamada *fase luminosa* de la explosión, se caracteriza porque en un tiempo muy corto como de un minuto, la temperatura de brillo de microondas de un área pequeña del flóculo puede aumentar unas cien veces hasta $10^8 K$ indicando el inicio de un *estallido impulsivo*. Se ha sugerido que el mecanismo mediante el cual es emitida una explosión impulsiva es la radiación sincrotrónica, el campo magnético necesario para el proceso sincrotrónico se produce en los campos asociados a las regiones solares activas.

Se ha visto que el principio de un estallido está acompañado frecuentemente por dos clases de emisión en microondas, la elevación y descenso gradual y los estallidos impulsivos. No obstante, las señales de radio más espectaculares y características de la fase óptica del destello ocurren en frecuencias de longitud de onda métrica, a estos estallidos se les conoce como *estallidos Tipo III*, o *explosiones de rápido corrimiento*. Poseen una característica extraordinaria, un rápido corrimiento desde altas a bajas frecuencias en un corto intervalo de tiempo, lo que hace que este estallido aparezca como una línea con pendiente abrupta en los registros de espectrómetros. Frecuentemente es acompañado por una segunda armónica, un estallido gemelo con frecuencia del doble al original. La emisión Tipo III se observa en frecuencias de $600 MHz$, $\lambda = 0.5 m$ y las longitudes de onda más largas que pueden penetrar en la ionosfera de la Tierra.

El Australiano J.P. Wild sugiere que los estallidos Tipo III son generados por rápidas corrientes de electrones disparados desde los destellos generadores y remontándose a través de la corona, los electrones excitan en cada

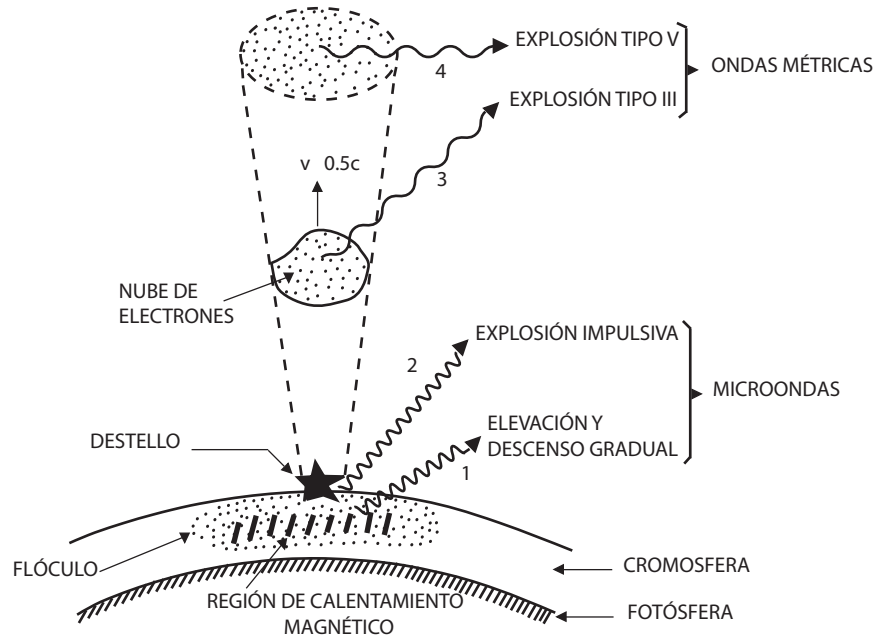


Figura 3.7: Representación esquemática de los fenómenos típicos de radio que acompañan a un pequeño destello, los números inician la secuencia normal de los eventos

nivel ondas de plasma que oscilan en la frecuencia crítica local f_0 (ecuación 3.10), las ondas de plasma se convierten en ondas de radio observadas, de frecuencia f_0 y $2f_0$, probablemente mediante la separación de pequeños grupos de iones positivos y electrones. El estallido gemelo es debido a que la onda resultante está también dirigida hacia abajo, en dirección de la fotosfera y se recibe solamente por reflexión. Un cálculo de la rapidez a la que tiene que ascender la perturbación para producir índices de corrimiento de 10 a 100 MHz por segundo, resultó ser de un tercio de la rapidez de la luz. Los estudios de los estallidos con interferómetros, confirmaron que las fuentes se alejaban a velocidades que variaban de $0.2c$ a $0.8c$.

Aproximadamente un 10% de los grupos de estallidos Tipo III son seguidas por un breve período de emisión continua, a este fenómeno se le conoce como *estallido Tipo V*, se cree que es radiación sincotrónica debido a electrones atrapados en intrincados campos magnéticos lejos de la Corona. La figura 3.7 muestra los fenómenos típicos de radio asociados a un pequeño destello.

3.2.3. La secuela de un gran destello

Los estallidos Tipo III y Tipo V son fenómenos típicos de un destello pequeño, cuando el destello llega a desarrollarse más allá de esta etapa da origen a todo un nuevo conjunto de radiofenómenos característicos de un gran destello. Varios minutos después de desaparecer los estallidos de corrimiento rápido, aparece una nueva clase de estallidos conocido como *Tipo II*, se parecen a sus precursores en varios aspectos, muestran también una segunda armónica y un desplazamiento sistemático de frecuencia, pero, el corrimiento es mucho más lento y rara vez excede 1 MHz por segundo. La segunda armónica aparece más de la mitad de las veces, y en los estallidos de corrimiento rápido es más raro.

Estos estallidos de desplazamiento lento nacen también de oscilaciones de plasma excitadas por alguna perturbación dirigida hacia afuera, sin embargo la desviación de frecuencia corresponde a una velocidad de sólo 1000 Km/seg. Como la velocidad a la que asciende es 10 veces la del sonido en la corona, se cree que la perturbación es una onda de choque supersónica creada por erupción explosiva de materia (figura 3.9). Incluso cerca del máximo de manchas solares, suceden estallidos Tipo II con un promedio de tan sólo una cada 50 horas, en contraste con el promedio de estallidos Tipo III, que es de una cada pocos minutos.

Una emisión continua de larga duración a continuación de una ráfaga, es conocida como *explosión Tipo IV*, aunque el término explosión es inadecuado para un fenómeno que puede durar horas. El estallido Tipo IV se divide en tres clases. El llamado de Tipo IVA, se debe a una fuente de emisión pequeña que permanece inmóvil cerca de la ráfaga, los cuales emiten radiación sincrotrón. Las de Tipo IVB son debido a que detrás del frente de choque siguen su rastro una nube de plasma, estos electrones emiten radiación que se observa como un estallido móvil. La radiación Tipo IVC de larga vida, anuncia el final del destello, es mantenida por electrones que escapan lentamente de la nube y que se diluyen tan sólo para ser encaminados de regreso al lugar de la ráfaga, guiados por la líneas del campo magnético. En la figura 3.9 se muestra las fases que ocurren durante un gran destello. La figura 3.8 muestra los tipos de estallidos, clasificados según la frecuencia y el tiempo de duración.

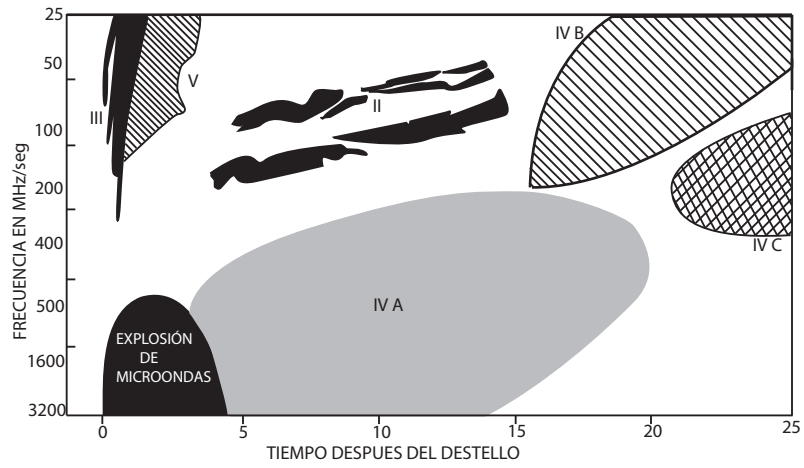


Figura 3.8: Bosquejo idealizado de los fenómenos de radio de un gran destello, como podrían ser expuestos en un espectrómetro de banda ancha.

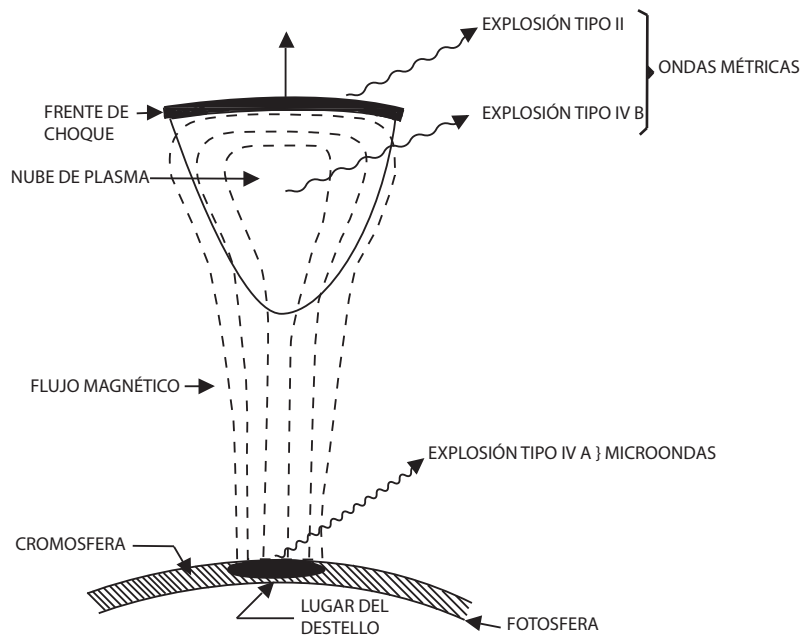


Figura 3.9: Dibujo esquemático de la segunda fase de un gran destello

Capítulo 4

Receptores en radio astronomía

Los receptores en astronomía, conocidos también como *radiómetros*, son un conjunto de elementos electrónicos que procesan la señal hasta dejarla en un formato adecuado para su análisis. Las señales recibidas son muy débiles, por lo tanto el receptor debe tener alta sensibilidad y estabilidad. La radiación es colectada por una antena, luego el receptor la transforma en una señal eléctrica, esta señal es entonces amplificada, detectada e integrada, y la salida es registrada por medio de algún dispositivo de grabación, generalmente una computadora.

4.0.4. Receptor superheterodino

La figura 4.1 es el esquema básico de un tipo de receptor conocido como receptor *superheterodino*. La señal recibida con frecuencia f_R es filtrada y

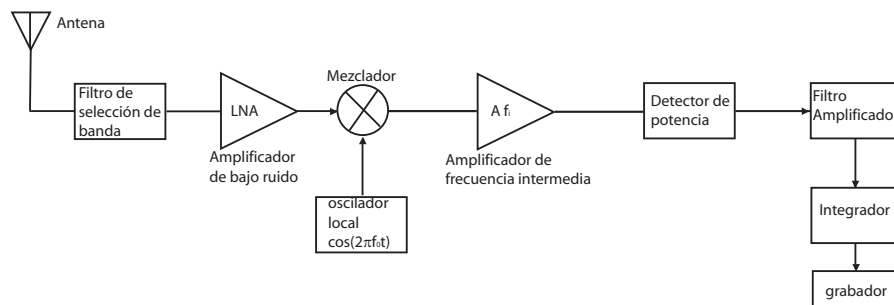


Figura 4.1:

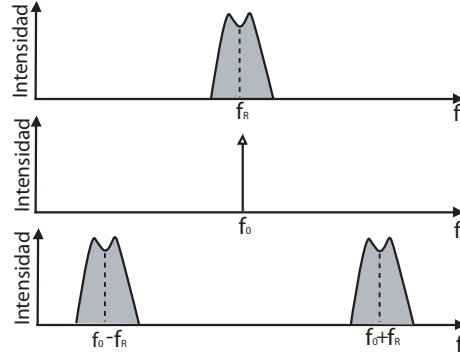


Figura 4.2:

amplificada, luego es mezclada o multiplicada por una señal de frecuencia f_0 generada en el oscilador local, la multiplicación de estas señales, produce una señal ó señales que tengan una frecuencia que sea, la suma ($f_R + f_0$) ó la diferencia ($|f_R - f_0|$), de las señales mezcladas. El proceso se ve gráficamente en la figura 4.2, la señal recibida tiene cierto ancho de banda, con una frecuencia central f_R . Matemáticamente el proceso puede analizarse considerando que ambas señales son senoidales con frecuencia f_R y f_0 , sea $A_R \cos(2\pi f_R t)$ la señal de interés, y $A_0 \cos(2\pi f_0 t)$ la señal del oscilador local, las señales son multiplicadas por el mezclador y el resultado es:

$$A_0 A_R \cos(2\pi f_0 t) \cos(2\pi f_R t) = \frac{A_0 A_R}{2} [\cos(2\pi(f_0 - f_R)t) + \cos(2\pi(f_0 + f_R)t)] \quad (4.1)$$

El objetivo de mezclar las señales es correr el espectro de la señal de interés a una frecuencia mucho más baja, esto debido a que realizar filtros y amplificadores a altas frecuencias con ancho de banda estrecha requiere entre otras cosas, de un factor de calidad Q muy alto en los filtros, por lo tanto en la ecuación 4.1 se elige la señal con frecuencia $f_0 - f_R$ y se filtra la frecuencia $f_0 + f_R$. La frecuencia resultante del mezclado se conoce como frecuencia intermedia (FI), y está dada por la expresión 4.2.

$$f_{FI} = f_0 - f_R \quad (4.2)$$

La multiplicación de las señales presenta un problema, debido a que un multiplicador analógico no preserva la *polaridad* de la diferencia entre las dos frecuencias, y al hacer el producto no hay diferencia entre $\cos(2\pi(f_0 - f_R)t)$, y $\cos(2\pi(f_R - f_0)t)$, como consecuencia las bandas localizadas simétricamente arriba y abajo de la frecuencia del oscilador local son desplazadas a la misma frecuencia intermedia f_{FI} , de las dos señales, una es la deseada y la otra es conocida como la frecuencia imagen f_{im} , la frecuencia imagen representa un problema serio porque puede ser de mayor intensidad que la señal

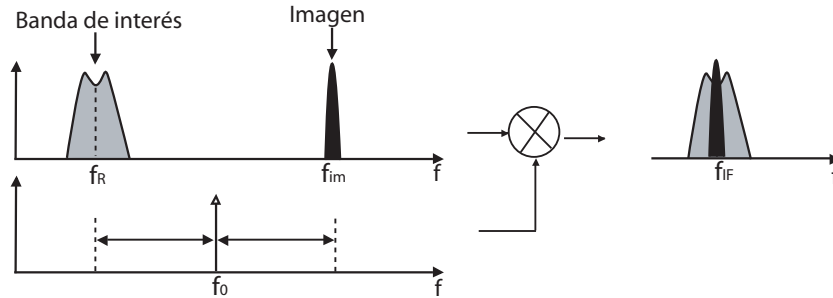


Figura 4.3: El receptor superheterodino presenta el problema de la frecuencia imagen, las frecuencias colocadas simétricamente alrededor del oscilador local son desplazadas a la misma f_{FI}

de interés. En la figura 4.3 se muestra que la señal de interés y la imagen se traslapan en la frecuencia intermedia. Para tratar de atenuar la frecuencia imagen, se introduce un filtro antes de que las señales sean pasadas por el multiplicador, el filtro debe tener muy pocas pérdidas en la banda deseada y gran atenuación en la banda de la frecuencia imagen, esto es posible cuando la frecuencia $2f_{FI}$ es mantenida lo suficientemente grande, en la figura 4.4a se ve que con $2f_{FI}$ grande se logra una mayor atenuación de la imagen, por el contrario si es pequeña, como en 4.4b el nivel de atenuación es menor. Ya que un valor de $2f_{FI}$ grande ayuda a atenuar la frecuencia imagen, se puede incluir más de una frecuencia intermedia agregando más mezcladores en la arquitectura superheterodina. La primera frecuencia intermedia se elige de un valor alto y las sucesivas van disminuyendo, en la figura 4.5 se ve un receptor más completo con doble frecuencia intermedia, en los puntos B y C se trata de atenuar lo más posible la frecuencia intermedia junto con las interferencias, luego se mezcla la señal con el primer oscilador local como se observa en la parte D de la figura 4.5, debido a que la primera FI es grande se logra que la señal deseada sea de mayor intensidad al traslaparse con la imagen. Después del primer mezclador la señal es filtrada para intentar disminuir el ruido como se ve en E, enseguida entra el segundo oscilador local para obtener una FI más pequeña, en este mezclador la frecuencia imagen no representa mucho problema, debido a la acción de los filtros anteriores. En el punto G se muestra el efecto del filtro después del segundo mezclador, finalmente en H la señal ha sido amplificada.

4.0.5. Detector

El detector de un radiómetro permite medir alguna propiedad de la señal recibida, ya sea la potencia, el contenido espectral o algo más específico como la forma y el período de los pulsos para el caso de las observaciones

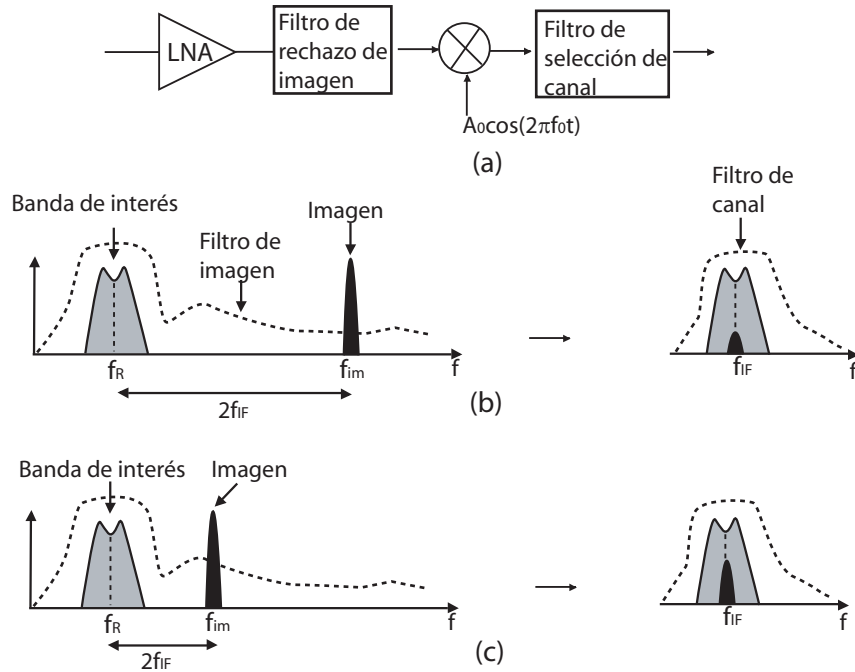


Figura 4.4: Con una frecuencia intermedia más alta se logra atenuar más la frecuencia imagen

de pulsares. Para realizar mediciones de potencia existen diversos dispositivos como el *square law detector*, que es un elemento cuyo voltaje de salida es proporcional al cuadrado del voltaje de entrada, es decir proporcional a la potencia recibida. Otro dispositivo usado para medir potencia es el bolómetro que hace uso del cambio de temperatura experimentado por una resistencia cuando esta absorbe radiación. En el caso del espectrómetro CALLISTO, se emplea el circuito integrado AD8307 como detector de potencia, este integrado genera un voltaje de salida para cada nivel de potencia recibida.

4.0.6. Integrador

La salida del detector del radiómetro consiste de variaciones en el voltaje promedio. Es necesario suavizar la señal para obtener una forma de onda promedio, esta tarea es realizada por el integrador, que generalmente es un filtro paso bajas.

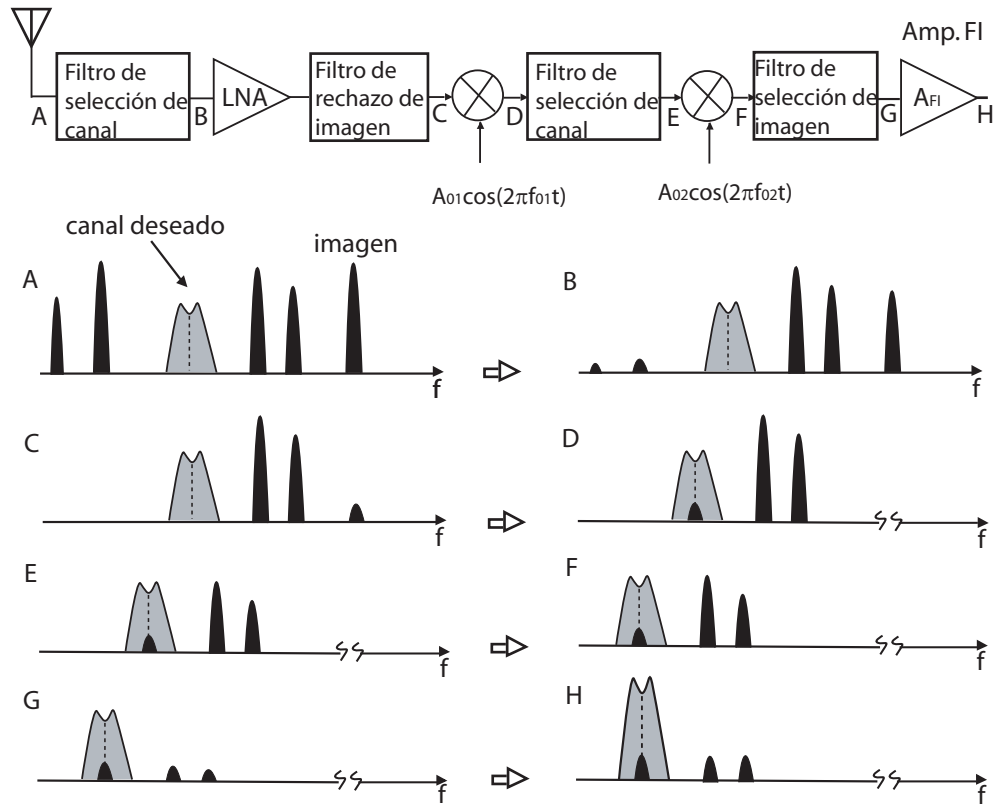


Figura 4.5: Receptor superheterodino con una arquitectura de doble frecuencia intermedia, se presenta la forma de las señales a la salida de las distintas etapas que la componen.

Capítulo 5

Antena logarítmica Periódica

5.1. Conceptos básicos de antenas

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una antena como la parte de un sistema transmisor o receptor diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas. La función de una antena es la de ser la región de transición entre una onda guiada y una onda en el espacio libre, o viceversa. En transmisión, una antena acepta energía de una línea de transmisión y la radia al espacio, en recepción la antena recoge energía de una onda incidente y la envía a la línea de transmisión.

Cuando se estudian las antenas, usualmente se describe sus propiedades como antena transmisora, como consecuencia del teorema de reciprocidad no se necesita hacer distinción entre la función de transmisión y recepción de una antena en el análisis de sus características de radiación. Todas las antenas pueden ser evaluadas en términos de los siguientes parámetros: patrón de radiación, ancho de haz, ancho de banda, apertura, ganancia, relación delante-atrás, impedancia y polarización.

5.1.1. Intensidad de radiación

El sistema coordenado que comúnmente se utiliza en antenas es el esférico, en el cual para especificar una dirección en el espacio se utilizan los dos ángulos θ y ϕ , y los vectores unitarios que forman una base ortogonal son \hat{r} , $\hat{\theta}$ y $\hat{\phi}$.

La onda electromagnética radiada está compuesta de un campo eléctrico

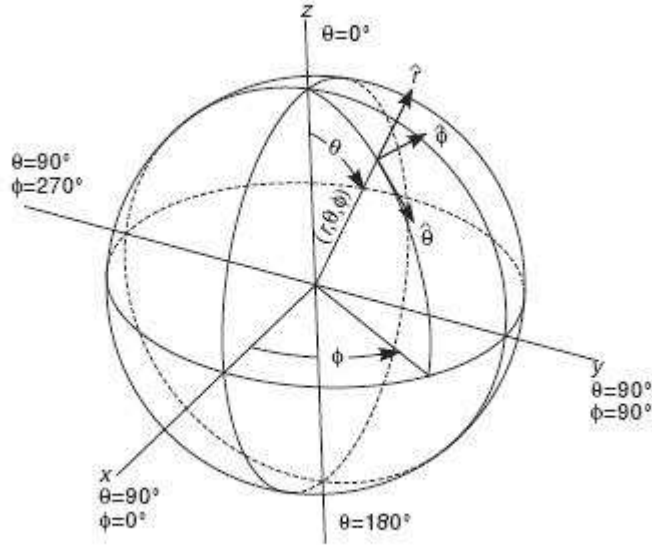


Figura 5.1: Sistema de coordenadas esféricas, en este sistema de coordenadas se definen los vectores unitarios \hat{r} , $\hat{\theta}$, $\hat{\phi}$, que forman una base ortogonal

\vec{E} (V/m) y uno magnético \vec{H} (A/m); ambas magnitudes vectoriales y están ligadas por las ecuaciones de Maxwell. A partir de los valores eficaces de los campos se obtiene la densidad de flujo por unidad de superficie mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{q}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \text{ W/m}^2 \quad (5.1)$$

Donde se ha supuesto para los campos una variación temporal armónica y los símbolos *, *Re* y \times denotan el complejo conjugado, la parte real y el producto vectorial. Para los campos radiados, los módulos del campo magnético y eléctrico se relacionan por la impedancia característica del medio η , que en el vacío vale $120\pi\omega$. La densidad de potencia radiada también se puede calcular a partir de las componentes transversales del campo eléctrico

$$q(\theta, \phi) = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{\eta} \quad (5.2)$$

La potencia total radiada se obtiene integrando la densidad de potencia en una superficie esférica que encierra a la antena

$$P_r = \iint_s \vec{q}(\theta, \phi) \cdot \vec{ds} \quad (5.3)$$

La intensidad de radiación es la potencia total radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección; sus unidades son watts por estereoradián y a grandes distancias tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena. La relación entre la intensidad de radiación y la densidad de potencia radiada es

$$K(\theta, \phi) = \rho(\theta, \phi)r^2 \quad (5.4)$$

Y la potencia total radiada también se puede obtener integrando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio

$$P_r = \iint_{4\pi} K(\theta, \phi)d\Omega \quad (5.5)$$

El diferencial de ángulo sólido en coordenadas esféricas es

$$d\Omega = ds/r^2 = \sin\theta d\theta d\phi \quad (5.6)$$

5.1.2. Patrón de radiación

El patrón de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de la dirección en el espacio. La antena se sitúa en el origen del sistema de coordenadas y a una distancia constante se expresa el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ, ϕ) . Si el patrón es medido lo suficientemente lejos de la antena no hay cambios del patrón con la distancia, y entonces el patrón es llamado *patrón de campo lejano*. El patrón medido a corta distancia de la antena se le conoce como *patrón de campo cercano*, y es función del ángulo y la distancia. El patrón de radiación es medido en la región de campo lejano, donde no ocurren cambios del patrón con la distancia, por lo tanto será únicamente función de θ y ϕ en una superficie de radio constante. El patrón puede ser expresado en términos de la intensidad de campo eléctrico o magnético, llamado *patrón de campo*, o en términos de la intensidad de radiación, llamado *patrón de potencia*. Debido a que la densidad de potencia es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico, la representación gráfica de un patrón de potencia contiene la misma información que un patrón de radiación de campo. En la figura 5.2 se ve un patrón de radiación en tres dimensiones, para antenas linealmente polarizadas el plano E se define como el que forman la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. El plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección. En la práctica, la información necesaria del patrón tridimensional puede ser obtenida tomando solo algunos cortes en dos dimensiones del patrón, estos cortes pueden hacerse de muchas formas, pero los más comunes son los que se hacen siguiendo los meridianos de

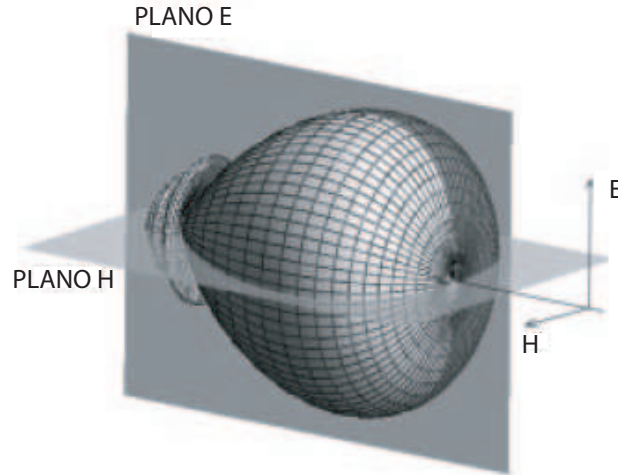


Figura 5.2: Patrón de radiación en tres dimensiones, generalmente es suficiente tener la información solamente en los planos principales.

una hipotética esfera (cortes con ϕ constante) o los paralelos (cortes con θ) constante. La información de todos los cortes es excesiva, por lo tanto solo se toman la de los planos principales.

El corte en dos dimensiones se representa en coordenadas polares donde el ángulo representa la dirección del espacio, mientras el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia. El patrón bi-dimensional también puede ser representado en coordenadas cartesianas, donde la abscisa es el ángulo y la ordenada el campo o la densidad de potencia. Ambas representaciones se muestran en la figura 5.3, el patrón se representa normalizando el valor máximo a la unidad, al ser una relación de potencias el patrón puede ser expresado en decibeles. De la representación gráfica del patrón de radiación se definen algunos parámetros importantes de las antenas.

En el diagrama polar de la figura 5.3 se aprecia una zona en la que la radiación es máxima, se le denomina haz *principal* o *lóbulo principal*. Las zonas de menor amplitud que rodean al máximo se les conoce como *lóbulos laterales*, y al lóbulo lateral de mayor amplitud se denomina lóbulo secundario.

El *ancho de haz* es una medida de la estrechez del patrón de radiación de una antena. En el diagrama polar de la figura 5.3 es la excursión angular entre las direcciones en las que el valor del campo ha caído a 0.707 del valor máximo.

La *relación delante-atrás* (D/A) es el cociente entre el valor del patrón en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta, se expresa en decibeles.

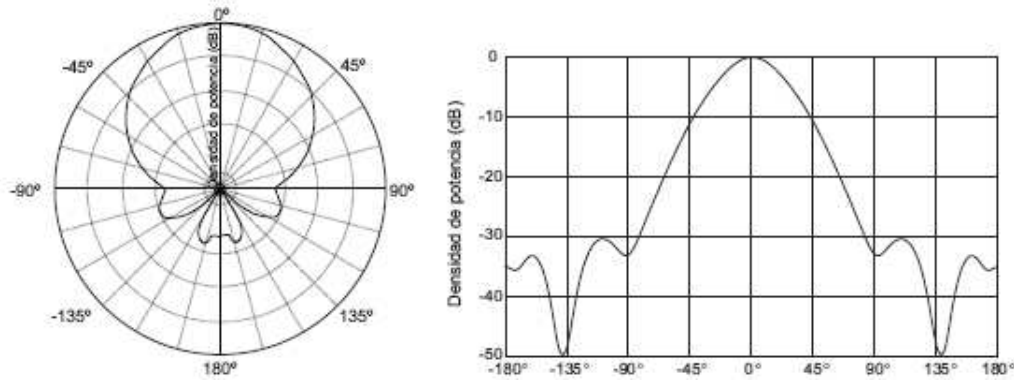


Figura 5.3: Patrón de radiación en un plano principal, a la izquierda la representación en coordenadas polares, a la derecha la representación en coordenadas cartesianas.

5.1.3. Directividad

Para una antena no isotrópica la directividad D es igual a la razón de la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena.

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (5.7)$$

Mientras no se especifique la dirección angular, se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho_{max}(\theta, \phi)}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (5.8)$$

5.1.4. Polarización

La polarización es otro parámetro significativo de las antenas, las ondas electromagnéticas pueden ser radiadas en varios planos y en cada punto del espacio existirá un vector de campo $\vec{E}(\vec{r}, t)$, que es función del espacio y el tiempo. La polarización es una indicación de la orientación del vector de campo en un punto fijo del espacio al transcurrir el tiempo.

5.1.5. Ancho de banda

Por su geometría finita, las antenas están limitadas a operar adecuadamente en un margen o banda relativamente estrecha de frecuencias. El intervalo

de frecuencias donde los parámetros de la antena no sobrepasa los límites prefijados, se le denomina ancho de banda (BW, por sus siglas en inglés) de la antena. El ancho de banda se puede especificar como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumple las especificaciones y la frecuencia central.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (5.9)$$

Para antenas de banda ancha se suele especificar en la forma

$$BW = \frac{f_{max}}{f_{min}} : 1 \quad (5.10)$$

El ancho de banda de la antena lo impone el sistema del que forme parte. Los parámetros relacionados con el ancho de banda se suelen dividir en dos grupos, según se relacionen con el patrón de radiación o con la impedancia. Los parámetros relacionados con el patrón de radiación que afecta el ancho de banda de la antena son la directividad, la polarización, el nivel del lóbulo principal a secundario y la dirección de máxima radiación. En el caso de la impedancia, el ancho de banda de la antena está relacionado con el coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria.

El coeficiente de reflexión de la antena respecto a la línea de transmisión es

$$\rho = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (5.11)$$

En la ecuación 5.11 Z_a es la impedancia de la antena y Z_0 la impedancia de la línea de transmisión.

La relación de onda estacionaria se puede calcular a partir del coeficiente de reflexión

$$S = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (5.12)$$

Las antenas de banda estrecha se pueden modelar como un circuito resonante serie, con una impedancia de la forma

$$Z_a = R_a + jX_a = R_a(1 + jQv) \quad (5.13)$$

Q es el factor de calidad del circuito y X_a es la reactancia.

$$v = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \quad (5.14)$$

Si se especifica como ancho de banda el margen de frecuencias donde la relación de onda estacionaria es menor que un determinado valor S , de las ecuaciones anteriores se puede deducir el ancho de banda

$$BW = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{\left(\frac{Z_0}{R_a}\right) (S - 1) \left(S - \frac{Z_0}{R_a}\right)}{S}} \quad (5.15)$$

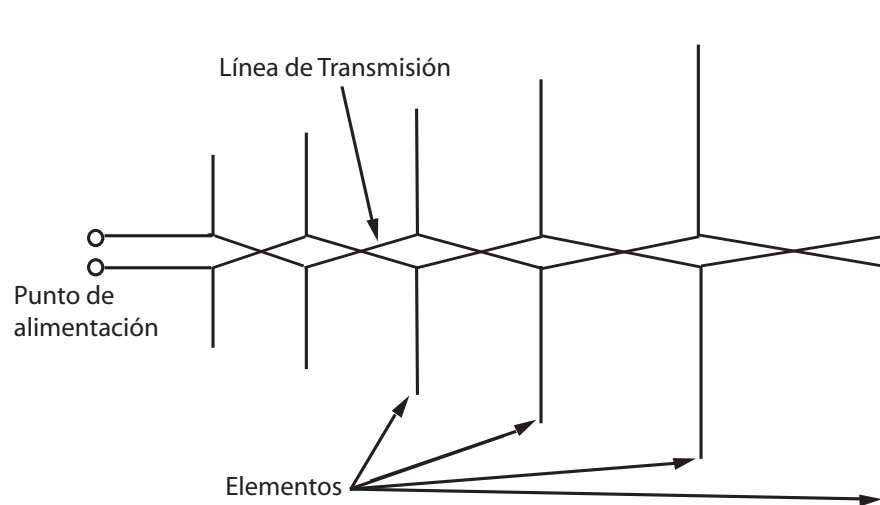


Figura 5.4: Componentes básicos de un arreglo logarítmico periódico de dipolos.

5.2. Arreglo logarítmico periódico de dipolos

La antena del tipo Arreglo Logarítmico Periódico de Dipolos (Log-Periodic Dipole Array-LPDA) mostrada en la figura 5.4 pertenece a una familia de antenas conocidas como logarítmicas periódicas, está formada por una agrupación de dipolos alimentados por el vértice, el elemento más largo tiene una longitud de aproximadamente $\frac{1}{2}\lambda$ de la frecuencia más baja de operación. El elemento más corto es usualmente $\frac{1}{2}\lambda$ de la frecuencia más alta de operación. La línea de transmisión conecta los puntos centrales de cada elemento en la serie de forma alternada, provocando un desfase de 180 grados entre los dipolos. El arreglo de elementos y el método en que se alimentan resulta en una ganancia y relación delante atrás relativamente constantes en el rango de operación de la antena. La agrupación de dipolos funciona de la siguiente manera: a una frecuencia dada, el dipolo resonante ($L_n \approx \lambda/2$) radiará la mayor parte de la potencia, mientras tanto los elementos de longitud mayor actúan como reflectores y los de longitud menor como directores, con este comportamiento el patrón de radiación presenta el máximo en la dirección del vértice. El elemento resonante cambia con la frecuencia, desplazando la zona activa a lo largo de la antena en función de la frecuencia.

El diseño de la antena gira alrededor de tres variables de diseño interrelacionadas entre sí: α , τ y σ , cualquiera de las tres variables pueden ser definidas a partir de las otras dos. En la figura 5.5 se muestran los componentes de una LPDA, el ángulo α define el contorno de la antena y permite que toda dimensión sea tratada como un radio (R) de un círculo. Las dimensiones

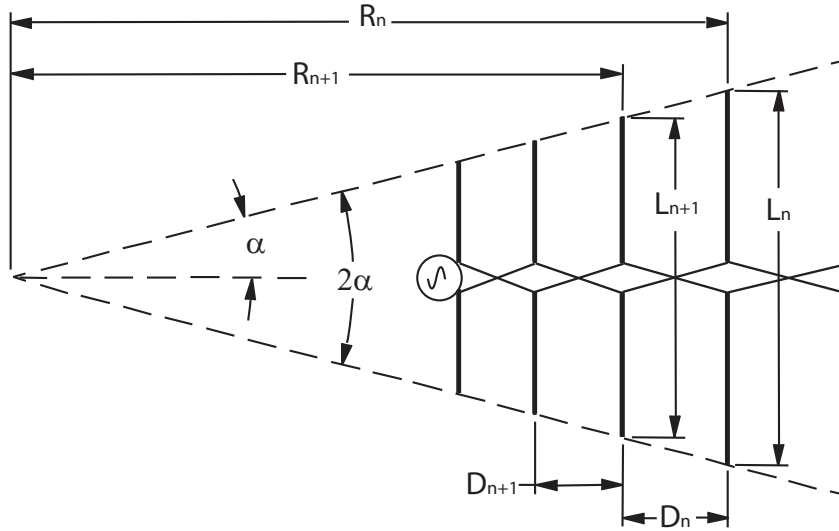


Figura 5.5: Relaciones fundamentales que definen un arreglo LPDA.

básicas de la estructura es la longitud de los elementos (L), la distancia (R) de cada elemento al vértice del ángulo α y la distancia entre elementos D . Una sola constante de diseño, τ , define la relación entre todas las dimensiones de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{D_{n+1}}{D_n} = \frac{L_{n+1}}{L_n} \quad (5.16)$$

Los elementos n y $n+1$ son sucesivos en el arreglo. El valor de σ , el espaciamiento en longitudes de onda entre un dipolo de $\frac{1}{2}\lambda$ y el elemento adyacente más corto se determina mediante la ecuación:

$$\sigma = \frac{1 - \tau}{4 \tan \alpha} = \frac{D_n}{2L_n} \quad (5.17)$$

Donde D_n es la distancia entre un par de elementos contiguos del arreglo y L_n es la longitud del más largo de los dos. Para cualquier valor de τ , se puede determinar un valor óptimo de σ :

$$\sigma_{opt} = 0.243\tau - 0.051 \quad (5.18)$$

La combinación de τ y su correspondiente valor óptimo de σ da el más alto rendimiento de una LPDA, en la figura 5.6 se muestra una curva de la ganancia en función de τ y σ , la línea que representa σ_{opt} es donde se tiene la mayor ganancia para un valor de τ . Para valores de τ entre 0.8 y 0.98, el valor óptimo de σ varía entre 0.143 a 0.187, en incrementos de 0.00243 por cada cambio de 0.01 en τ .

Para un rango de frecuencia dado, al incrementar el valor de τ se incrementa

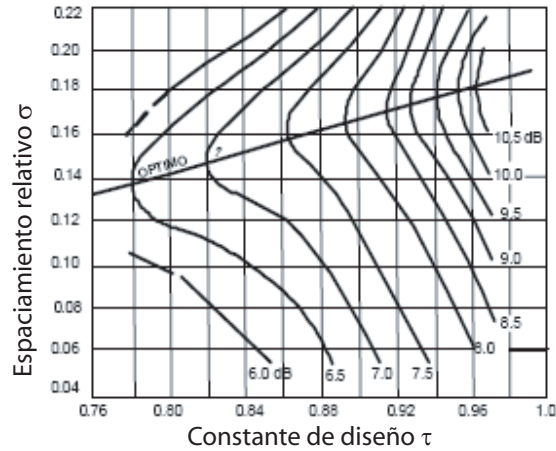


Figura 5.6:

la ganancia y el número de elementos requeridos. Incrementando el valor de σ se incrementa la ganancia y la longitud de la antenna.

De la figura 5.5 y las ecuaciones anteriores se ve que la estructura de la antenna es igual a si misma por un factor de escalamiento $1/\tau$ de todas sus dimensiones, debido a este escalamiento la antenna tiene las mismas propiedades a la frecuencia f que a la frecuencia τf . La consecuencia es que las propiedades eléctricas de la antenna se repiten periódicamente con el logaritmo de la frecuencia, el período es $|\log \tau|$. Si f_0 y f_1 son dos frecuencias distintas, relacionadas por el factor de escalamiento, entonces $f_1 = \tau f_0$, tomando el logaritmo en ambos lados se tiene $\log f_1 = \log \tau + \log f_0$, y se observa la periodicidad de la propiedades de la antenna, por eso a estas antenas se les conoce como logoperiódicas. Haciendo τ muy cercano a uno, la variación de la propiedades sobre la banda $(f, \tau f)$ puede ser muy pequeña.

En la figura 5.4 y 5.5 por la forma en que se alimentan los dipolos se considera que el punto de alimentación está unido a una línea balanceada, como una línea de transmisión de dos conductores. Si se usa cable coaxial para alimentar a la antenna, un diseño más conveniente es el de la figura 5.7, en este arreglo generalmente dos tubos son a la vez el soporte y la alimentación de los elementos, un cable coaxial es pasado a través de uno de los tubos, el conductor exterior del coaxial es conectado al tubo en cuyo interior está inmerso el cable, mientras tanto el conductor interior del coaxial se extiende y es conectado al otro tubo que forma la línea de alimentación de los elementos. Con este método se logra la alimentación cruzada con los 180° de fase entre elementos adyacentes y además se tiene

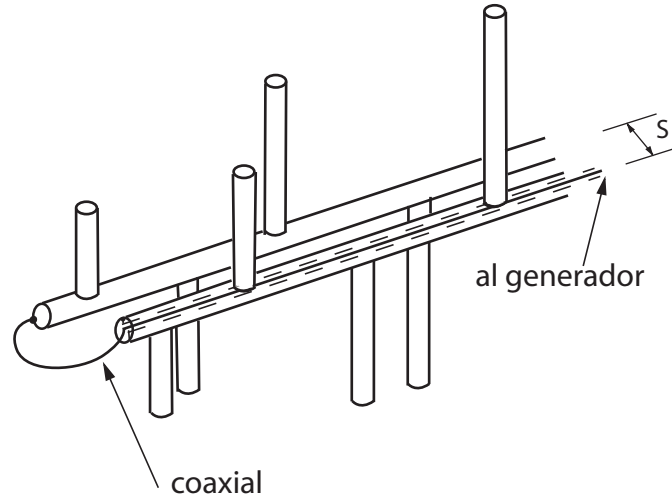


Figura 5.7: Procedimiento alternativo para la alimentación de los dipolos de una LPDA.

un simetrizador o balun*.

5.2.1. Un procedimiento de diseño para una LPDA

El siguiente procedimiento (paso a paso) para el diseño de una LPDA está tomado de [1].

- a) Elegir el ancho de banda de operación B entre f_1 , la frecuencia más baja de operación y f_n , la frecuencia más alta de operación.

$$B = \frac{f_n}{f_1} \quad (5.19)$$

- b) Elegir τ y σ para la ganancia promedio estimada.

$$0.8 \leq \tau \leq 0.98 \text{ y } 0.03 \leq \sigma \leq \sigma_{opt} \quad (5.20)$$

Donde σ_{opt} se calcula con la ecuación 5.18.

- c) Determinar el valor de la cotangente del ángulo α

$$\cot \alpha = \frac{4\sigma}{1 - \tau} \quad (5.21)$$

Aunque α no es usado directamente en los cálculos, $\cot \alpha$ es muy usado.

- d) Determinar el ancho de banda de la región activa B_{ar} de la ecuación

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot \alpha \quad (5.22)$$

*balun es el acrónimo de las siglas inglesas *balanced to unbalanced transformer*.

e) Determinar el ancho de banda del arreglo B_s de la siguiente manera

$$B_s = B \times B_{ar} \quad (5.23)$$

f) Calcular la longitud de la estructura L_n (tubos) que soportará a los elementos y será la línea de alimentación de los dipolos, el número de elementos N , la longitud de onda máxima λ_{max} y la longitud del elemento más largo l_1 .

$$L_n = \left(1 - \frac{1}{B_s}\right) \cot \alpha \times \frac{\lambda_{max}}{4} \quad (5.24)$$

$$\lambda_{max} = \frac{2.998 \times 10^8}{f_1} \quad (5.25)$$

$$N = 1 + \frac{\log B_s}{\log \frac{1}{\tau}} = 1 + \frac{\ln B_s}{\ln \frac{1}{\tau}} \quad (5.26)$$

$$l_1 = \frac{149.9616}{f_1} \quad (5.27)$$

L_n , λ_{max} y l_1 están dados en metros. Generalmente el valor calculado de N no será un número entero, si el valor fraccional es mayor a 0.3, se incrementa el valor de N al entero superior. Al incrementar el valor de N , también se incrementa el valor de L calculado en la ecuación 5.24. Debe examinarse el valor de L , N y l_1 para determinar si el tamaño del arreglo es o no adecuado para las necesidades requeridas. Si el arreglo es demasiado grande, puede incrementarse f_1 o decrementar σ o τ y repetir los pasos 2 a 6. Al incrementar f_1 se decrementan todas las dimensiones. Decrementando el valor de σ se decrementa la longitud del arreglo. Al decrecer el valor de τ , se reduce tanto la longitud del arreglo como el número de elementos.

g) Calcular la longitud de los elementos restantes mediante la ecuación siguiente.

$$l_n = \tau l_{n-1} \quad (5.28)$$

h) Determinar el espaciamiento entre elementos d_{1-2} .

$$d_{1-2} = \frac{(l_1 - l_2) \cot \alpha}{2} \quad (5.29)$$

En la ecuación 5.29 l_1 y l_2 son la longitud de los elementos más largos, y d_{1-2} es la distancia entre los elementos con longitud l_1 y l_2 . Los espaciamientos elemento a elemento restantes se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$d_{(n-1)-n} = \tau d_{(n-2)-(n-1)} \quad (5.30)$$

i) Elegir R_0 , la resistencia deseada del punto de alimentación.

$$R_0 = \frac{Z_0}{\sqrt{1 + \frac{Z_0}{4\sigma'Z_{AV}}}} \quad (5.31)$$

Los términos de la ecuación 5.31 son calculados con las siguientes ecuaciones.

La impedancia característica de la línea de transmisión central Z_0 está dada por:

$$Z_0 = \frac{R_0^2}{8\sigma'Z_{AV}} + R_0\sqrt{\left(\frac{R_0}{8\sigma'Z_{AV}}\right)^2 + 1} \quad (5.32)$$

σ' es el factor medio de espaciamento y está dado por

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sqrt{\tau}} \quad (5.33)$$

Z_{AV} es la impedancia característica promedio de un dipolo y está dado por

$$Z_{AV} = 120\left[\ln\left(\frac{l_n}{diam_n}\right) - 2.25\right] \quad (5.34)$$

La razón, $l_n/diam_n$ la razón longitud a diámetro del elemento n.

j) Una vez que la impedancia característica Z_0 ha sido determinada, puede ser alcanzada con una línea de transmisión de dos conductores que tienen un diámetro D y un espaciamento de centro a centro de S , como se muestra en la figura 5.7.

$$S = D \cosh(Z_0/120) \quad (5.35)$$

En la ecuación 5.35 D es el diámetro del tubo que soporta los elementos, cuando este es circular como en la figura 5.7, si en lugar de usar un conductor redondo se utiliza uno cuadrado, el diámetro equivalente del tubo cuadrado se calcula con la siguiente ecuación:

$$D \approx 1.18w \quad (5.36)$$

Donde w es el ancho de uno de los lados.

En el diseño de una antena LPDA, la relación $l_n/diam_n$ de cada elemento se escala por el factor τ , de forma que cada elemento tiene una relación $l_n/diam_n$ constante, sin embargo en la práctica no es posible mantener esta relación constante, ya que es muy difícil obtener alambres o tubos de todos los diámetros que resulten de los cálculos. Balanis [4] propone que los elementos se dividan en grupos, los elementos de cada grupo tendrán el mismo diámetro, pero diferente longitud, el número de grupos se determina

por el número total de elementos del arreglo. Usualmente tres grupos es suficiente, un grupo para los elementos más cortos, otro para los medianos y un tercero para los elementos más largos. Cuando la relación $l_n/diam_n$ no es constante para todos los elementos, para el cálculo de Z_{AV} en la ecuación 5.34 se emplea el promedio de la relación $l_n/diam_n$ de todos los elementos.

5.2.2. Diseño de la antena LPDA para el espectrómetro CALLISTO

Siguiendo el procedimiento visto en la sección anterior se diseñó la antena adecuada para el espectrómetro CALLISTO, el rango de la antena es de 100-840 MHz, la impedancia se diseñó a 50Ω . De acuerdo a la figura 5.6 la ganancia es cercana a $7.4 dBi$.

Se elige el parámetro τ y luego se calcula σ_{opt} :

$$\tau = 0.85$$

$$\sigma_{opt} = 0.15$$

Se calcula B con la ecuación 5.19

$$B = \frac{840}{100} = 8.4$$

$$\cot \alpha = 4$$

Con la ecuación 5.22 se encuentra el ancho de banda de la región activa B_{ar} .

$$B_{ar} = 1.1793$$

$$B_s = 15.061$$

La longitud de de la antena se obtiene con la ecuación 5.24.

$$L_n = 2.8 m$$

$$\lambda_{max} = 3 m$$

El número de elementos calculado es:

$N = 17.687$ Se redondea el valor del número de elementos N al entero siguiente.

$$N = 18$$

La longitud del elemento más largo es:

$$L_n = 1.5 m = 150cm$$

Con la ecuación 5.28 se calcula la longitud de los elementos restantes, en la figura 5.8 se ven los elementos y el número de subíndice que le corresponde a cada uno.

$$l_2 = 127.5cm \quad l_{11} = 127.5cm$$

$$l_3 = 108.38cm \quad l_{12} = 127.5cm$$

$$l_4 = 92.12cm \quad l_{13} = 127.5cm$$

$$l_5 = 78.3cm \quad l_{14} = 127.5cm$$

$$l_6 = 66.56cm \quad l_{15} = 127.5cm$$

$$l_7 = 56.57cm \quad l_{16} = 127.5cm$$

$$l_8 = 48.09cm \quad l_{17} = 127.5cm$$

$$l_9 = 40.87cm \quad l_{18} = 127.5cm$$

$$l_{10} = 34.74cm$$

A continuación se muestra el valor calculado del espaciamento entre elementos adyacentes.

$$d_{1-2} = 45cm \quad d_{10-11} = 10.42cm$$

$$d_{2-3} = 38.24cm \quad d_{11-12} = 8.86cm$$

$$d_{3-4} = 32.52cm \quad d_{12-13} = 7.52cm$$

$$d_{4-5} = 27.64cm \quad d_{13-14} = 6.4cm$$

$$d_{5-6} = 23.48cm \quad d_{14-15} = 5.44cm$$

$$d_{6-7} = 19.98cm \quad d_{15-16} = 4.64cm$$

$$d_{7-8} = 16.96cm \quad d_{16-17} = 3.92cm$$

$$d_{8-9} = 14.44cm \quad d_{17-18} = 3.34cm$$

$$d_{9-10} = 12.26cm$$

Para la elección del diámetro de los elementos se dividen en tres grupos, cada grupo compuesto de 6 elementos. En el cuadro 5.1 se muestra como se agruparon los elementos. La impedancia característica $l_n/diam_n$ de los dipolos se calcula con la ecuación 5.34, la relación longitud a diámetro promedio necesario para el cálculo de Z_{AV} se denota como K_{AVG} .

$$K_{AVG} = (l_n/diam_n)_{prom}$$

El promedio de la relación $l_n/diam_n$ de todos los elementos es:

$$K_{AVG} = 46,99$$

y la impedancia característica promedio de los dipolos es:

$$Z_{AV} = 192.02$$

La impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión se calculó con la ecuación 5.32 tomando en consideración que $R_0 = 50\Omega$.

$$Z_0 = 0,936$$

Una vez teniendo Z_0 se calcula la distancia S entre los soportes de los dipolos para obtener esa impedancia, para tal fin se utiliza 5.35.

Los canales usados son de $w = 2.54 cm$ de lado, entonces su diámetro equivalente D será:

$$D = 2.997 cm = 29.972 mm$$

entonces S de la figura 5.7 es: $S = 3.97cm$

que es la distancia de centro a centro de los tubos que soportan los elementos para conseguir la impedancia Z_0 .

5.2.3. Simulación de la antena

Se simuló la antena en un programa llamado *4NEC2*, este programa usa el método de los momentos, el programa necesita un archivo NEC para llevar a cabo la simulación, usando el programa *LPCAD28* se generó el archivo.

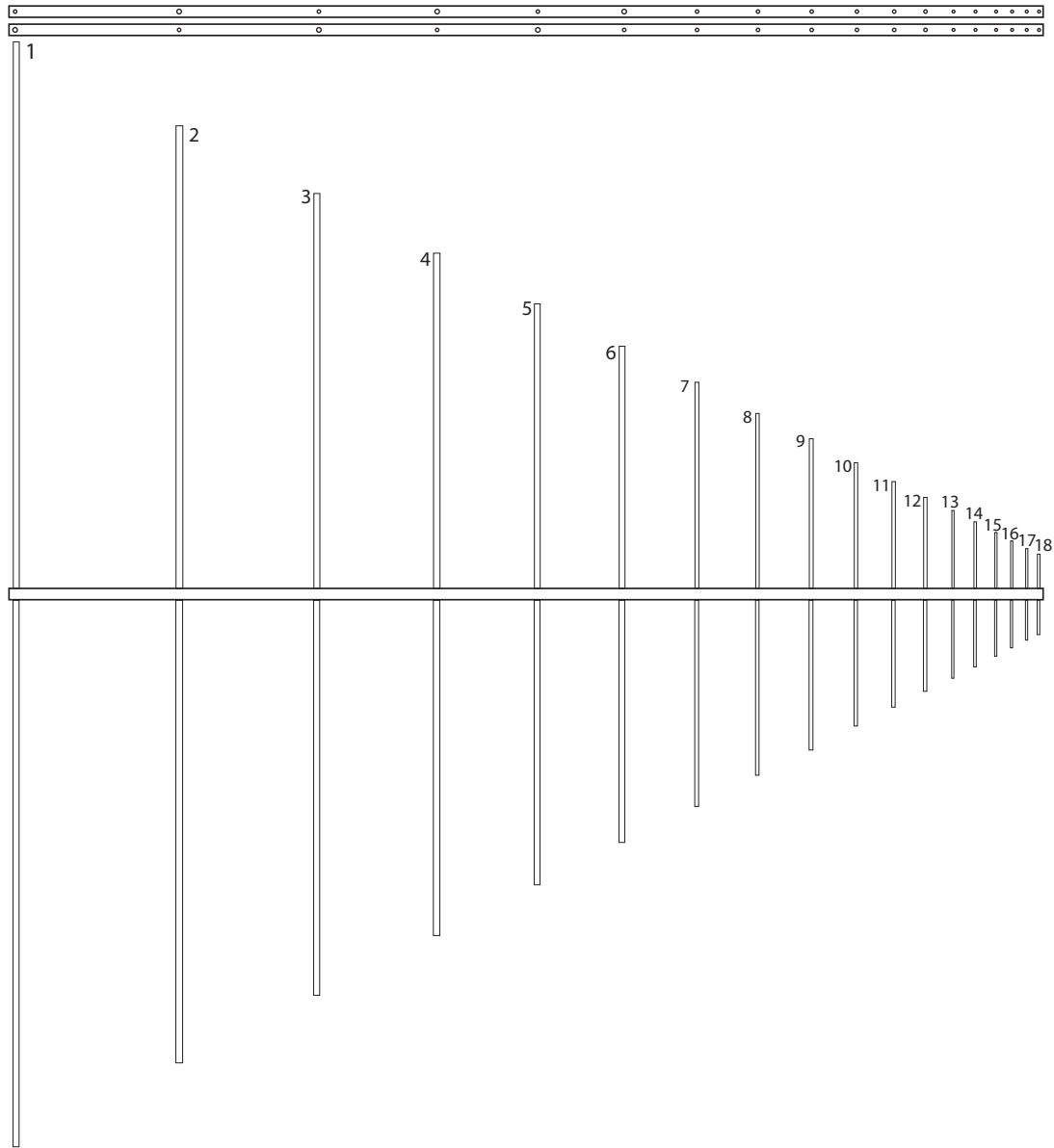


Figura 5.8: Elementos de la antena

Grupo	Diámetro
$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$	$12.7mm$
$l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}, l_{12}$	$9.5mm$
$l_{13}, l_{14}, l_{15}, l_{16}, l_{17}, l_{18}$	$7.9mm$

Cuadro 5.1: Agrupación de los elementos

Figura 5.9: Distribución de las perforaciones para los elementos

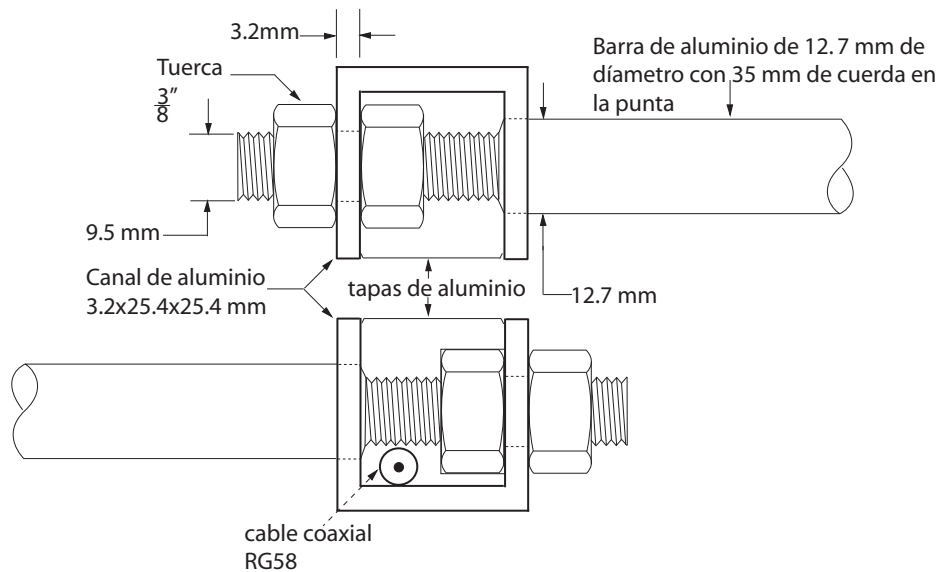


Figura 5.10: En la figura se ven los elementos de 12.7mm , con su cuerda y tuercas en ambas caras de la pared del canal, el cable coaxial que se describe en la figura 5.7 va en uno de los canales, es un coaxial RG58, en el vértice de la antena la malla del cable coaxial se une al canal en el que está inmerso, el núcleo del cable coaxial se conecta al canal opuesto

Ambos programas son de distribución libre. El objetivo de la simulación es obtener una aproximación al comportamiento que tendrá la antena en la realidad.

En la figura 5.15 se muestra los resultados de simulación del patrón de radiación para algunas frecuencias dentro del rango de operación, se puede observar que el lóbulo principal y la ganancia casi no cambian, pero en cada frecuencia cambia el número y la forma de los lóbulos laterales.

En el programa de simulación es posible hacer un barrido de frecuencia para observar la relación de onda estacionaria y el coeficiente de reflexión que se puede esperar.

En la figura 5.16 se ve la simulación para el rango de 100 a 500 MHz, una línea marca el lugar donde la relación de onda estacionaria es de 2,

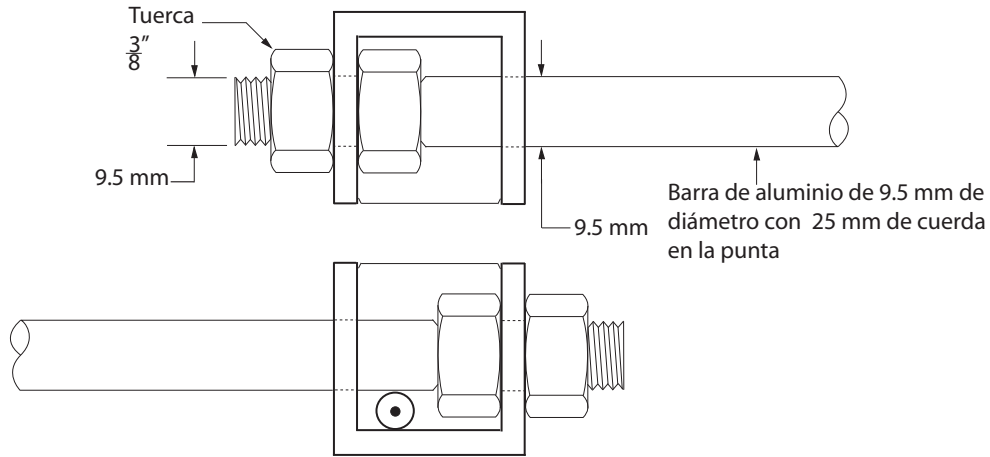


Figura 5.11: La figura muestra la forma en que se ensamblan los elementos de 9.5mm de diámetro

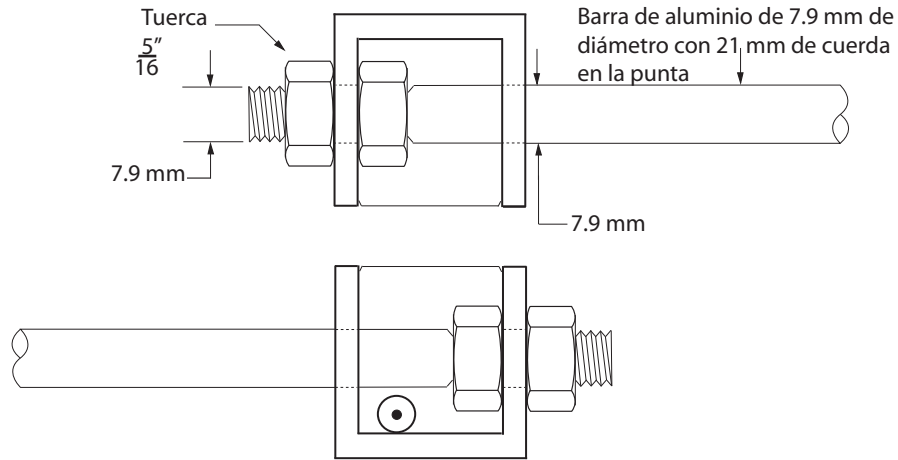


Figura 5.12: Los elementos de menor diámetro son de 7.9mm , estos elementos corresponden a las longitudes de onda más cortas

se observa que en un amplio rango del intervalo es menor a 2, y en otros intervalos es ligeramente mayor a 2. En la figura 5.17 ve el análisis para el rango de 500 a 840 MHz, la relación de onda estacionaria es menor a 2 en casi todo el intervalo, en el extremo superior del intervalo se incrementa un poco por arriba de 2. En el intervalo simulado los parámetros de la antena se mantienen relativamente constantes.

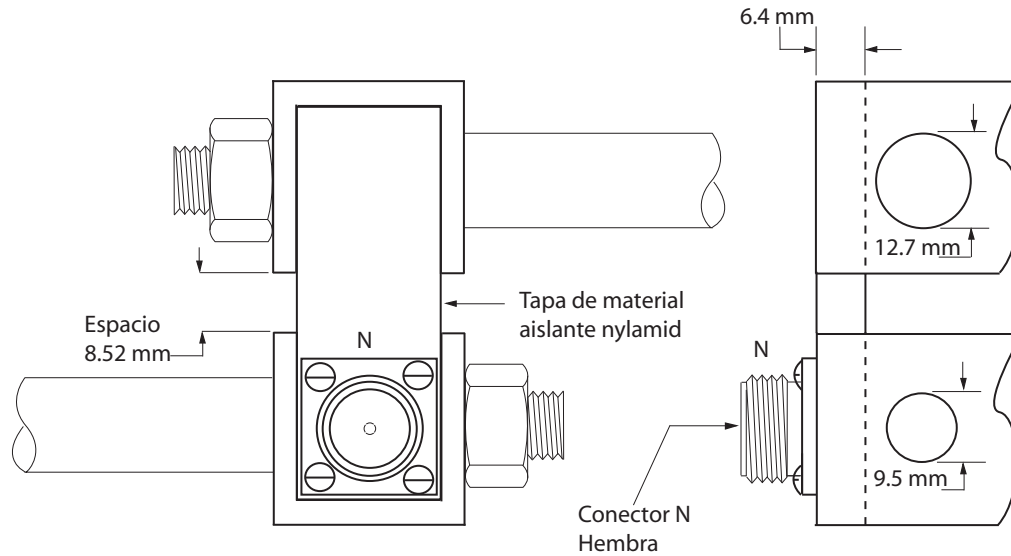


Figura 5.13: Un material aislante separa los canales de aluminio, en este va el conector N hembra de la antena

5.2.4. Determinación del patrón de radiación

En el Instituto de Geofísica no se cuenta con equipo para probar la antena, solo se pudo disponer de un analizador de espectros que fue prestado por personal del INAOE. Algunos ejemplos de equipo necesario es un generador de señales de RF, medidor de intensidad de campo, acoplador direccional y otros equipos de radiofrecuencia. Debido a que solo se contaba con el analizador de espectros se ideó una forma de medir el patrón de radiación. El método es el siguiente:

Aprovechando las señales de las transmisiones comerciales de radio FM y TV, se conecta la antena al analizador de espectros, se pone una referencia en la base de la antena y se marcan ángulos en pasos de 10 grados.

- Se selecciona una estación de radio o TV en el rango de operación de la antena.
- Con la antena conectada al analizador se gira la antena hasta encontrar la dirección de donde se recibe la mayor potencia de la señal, la dirección encontrada se toma como la referencia de 0° , se registra la potencia recibida.
- Se gira la antena cada 10° y se registra la potencia medida
- Se normaliza los datos dividiendo los valores obtenidos entre el valor más grande medido a 0° .
- Se grafican los datos en coordenadas polares para poder observar el patrón de radiación.



Figura 5.14: Fotografías de la antena

El resultado de la determinación del patrón de radiación se presenta en las figuras 5.18 a 5.22, las gráficas fueron generadas con Matlab. La señal en 96.1 MHz está muy cerca del límite teórico inferior de operación de la antena, las gráficas muestran que la antena es directiva en las frecuencias de prueba. La directividad de la antena es el único parámetro que se pudo medir, pero es un buen indicativo del funcionamiento de la antena, para fines astronómicos una antena directiva es muy importante.

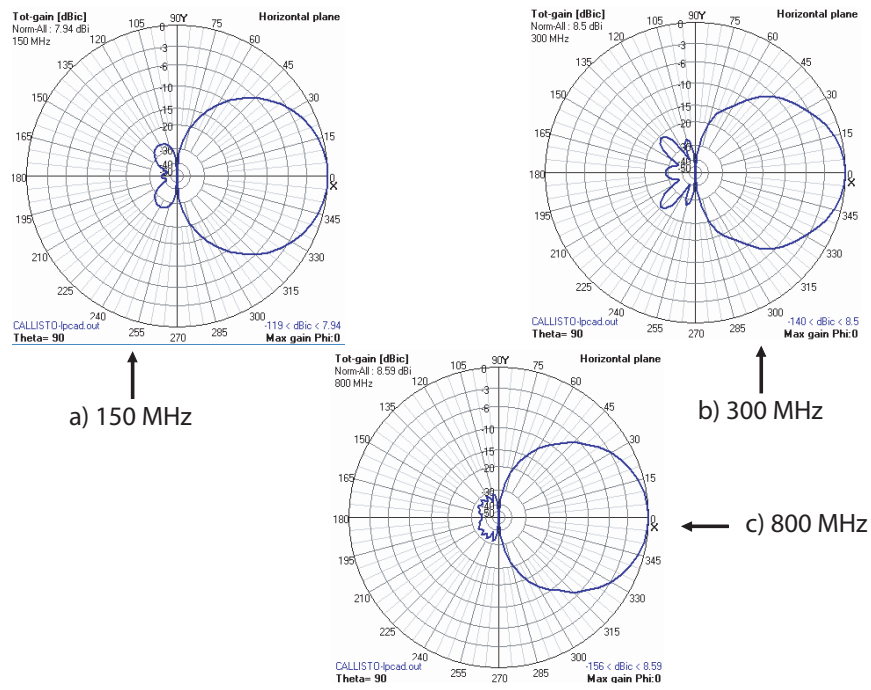


Figura 5.15:

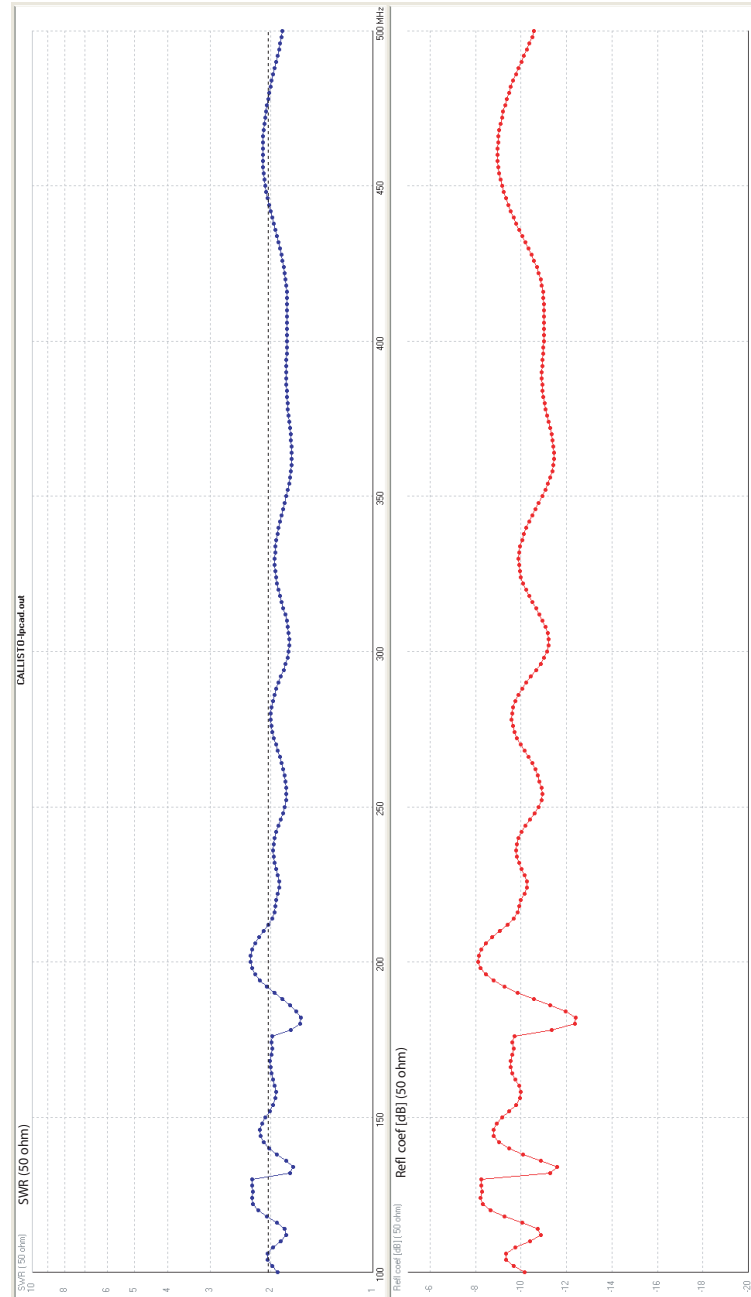


Figura 5.16: Relación de onda estacionaria y coeficiente de reflexión simulado en 4NEC2, rango de frecuencia 100-500 MHz.

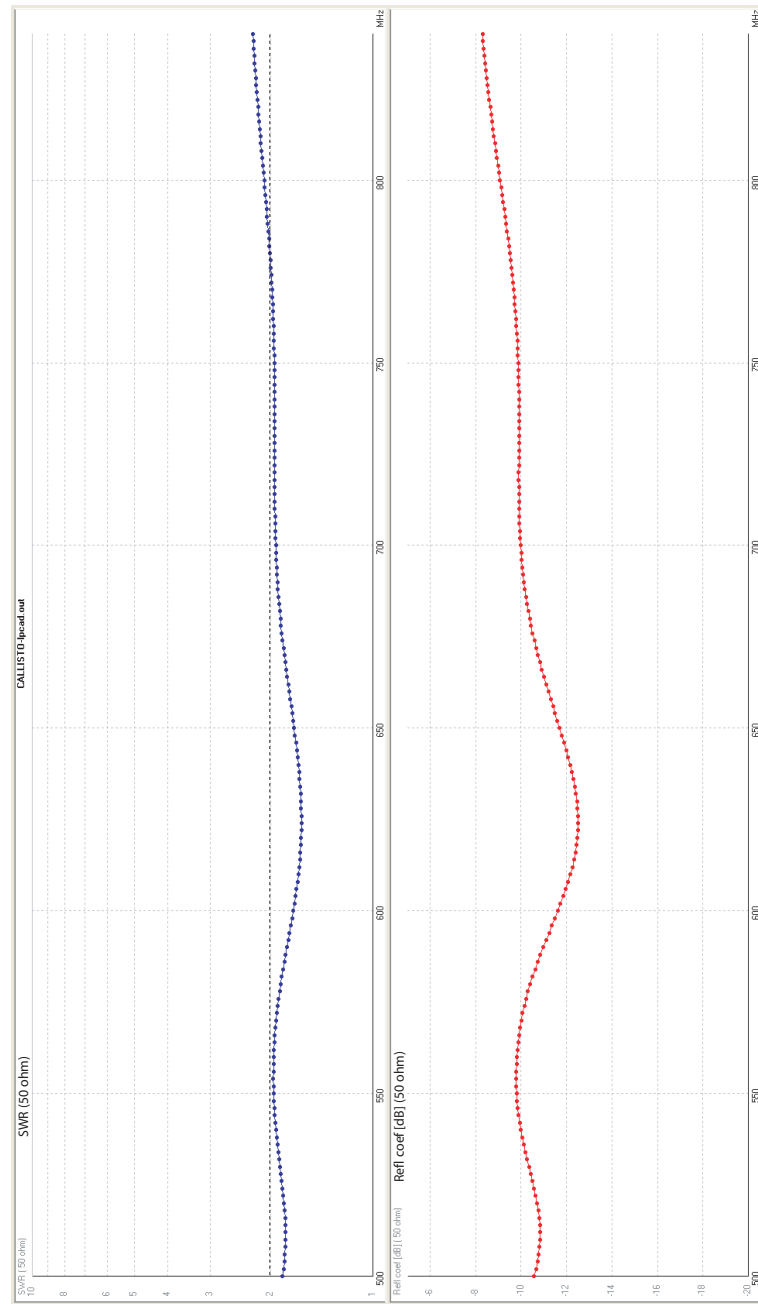


Figura 5.17: Relación de onda estacionaria y coeficiente de reflexión simulado en 4NEC2, rango de frecuencia 500-840 MHz.

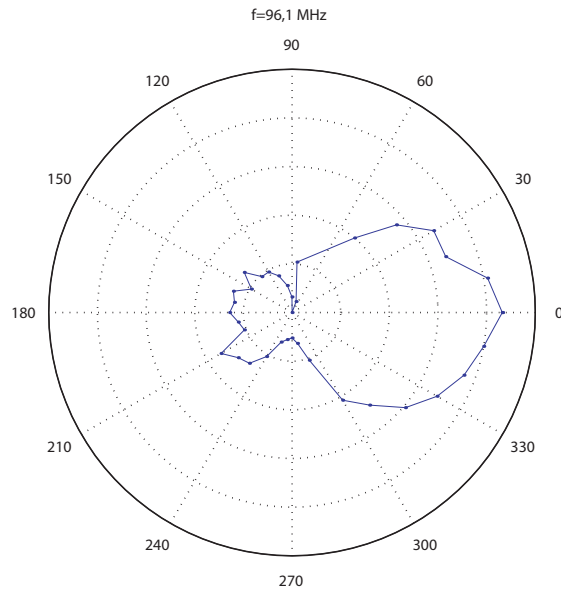


Figura 5.18: Patrón de radiación en 96.6 MHz

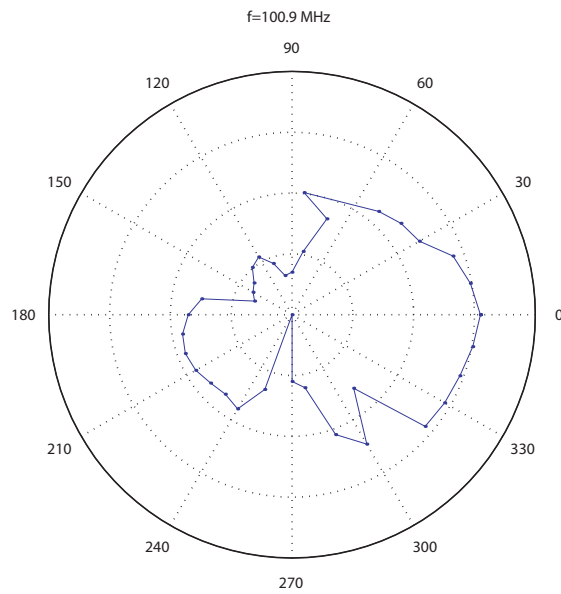


Figura 5.19: Patrón de radiación a 100.9 MHz

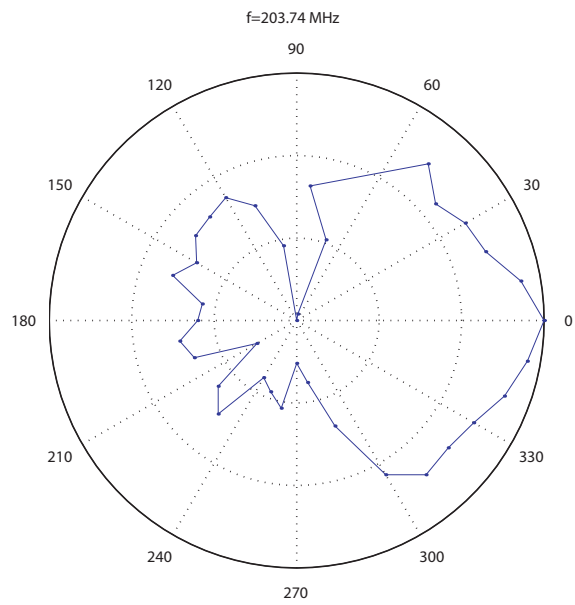


Figura 5.20: Patrón, 203,74 MHz.

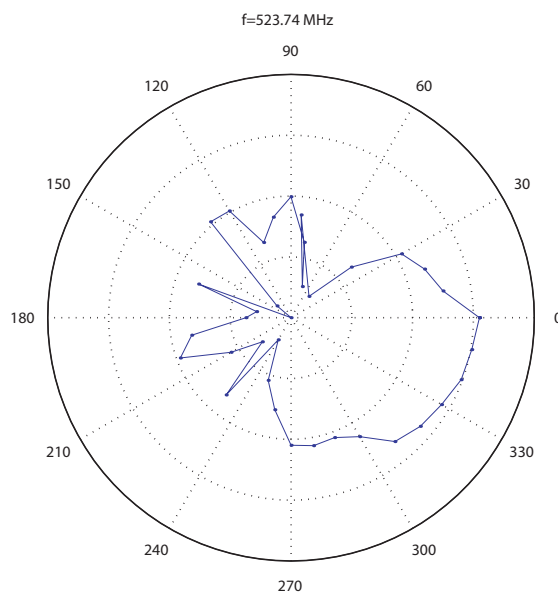
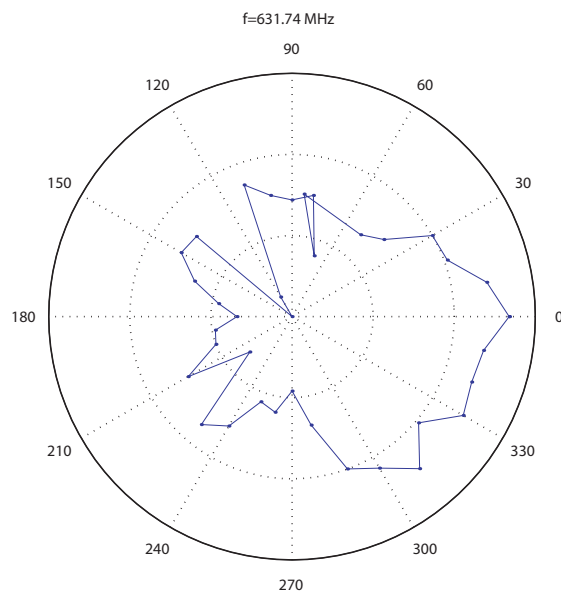


Figura 5.21: Patrón medido a 523.74 MHz.

Figura 5.22: Patrón en 631.74 MHz .

Capítulo 6

Espectrómetro CALLISTO

Como se vió en el capítulo 3, las radioemisiones de los estallidos solares son altamente variables, reflejando diferentes procesos de emisión y origen físico. Las emisiones se distinguen por su espectro y comportamiento temporal, y pueden ser distinguidos en espectrogramas.

Los espectrómetros son necesarios para identificar la naturaleza de la radio emisión de los estallidos solares. Los interferómetros solares no tienen suficientes canales para reemplazar a los espectrómetros con alta resolución en frecuencia. Hoy en día, debido a que muchos componentes electrónicos para la construcción de espectrómetros están disponibles en el mercado electrónico, estos pueden ser construidos en gran número y a precios bajos, y además resultan equipos pequeños y transportables. Esto abre nuevas posibilidades, en particular en lo concerniente al incremento en la interferencia debido al uso comercial del espectro radioeléctrico, espectrómetros idénticos pueden ser colocados en lugares distintos para observar diferentes ventanas de frecuencias libres de interferencia. También pueden ser llevados temporalmente a regiones remotas libres de interferencia.

6.1. El concepto de CALLISTO

El espectrómetro e-CALLISTO (un receptor) es una mejora del original CALLISTO (dos receptores), su nombre es un acrónimo de *enhancement-Compact Astronomical Low-Frequency, Low-Cost Instrument for Spectroscopy in Transportable Observatories*, su principal objetivo es la observación de la radioemisión de los estallidos solares. El Instrumento fue diseñado y

construido en el Instituto de Astronomía (ETH) de Zurich en Suiza. Ha sido distribuido en distintas instituciones alrededor del mundo para la observación del Sol durante las 24 horas del día. Los datos son recolectados por ETH vía internet y todos los participantes tendrán acceso completo a los datos de este proyecto. A continuación se enumeran los países participantes.

- a) CINESPA, Centro de Investigaciones Astrofísicas, San José Costarica.
- b) GAURI, Gauribidanur, India.
- c) NRAO, National Radio Astronomy Observatoru Green Bank, WV, USA.
- d) OOTY, Oatacamund, India.
- e) SSRT, Siberia, Rusia.
- f) KASI, Korea Astronomy and Space Science Institute, Republica de Korea.
- g) IGEF, Instituto de Geofísica, México.

El proyecto es una colaboración de ETH en el año Año Heliofísico Internacional (IHY, International Heliospheric Year). El programa año Internacional de la Heliofísica conmemora a lo largo del año 2007 el cincuenta aniversario de la primera celebración de un evento que tuvo lugar en 1957: El año Geofísico Internacional. La celebración consiste en mantener a lo largo del 2007 actividades bien definidas:

- Coordinación de proyectos científicos que se propongan desde las diferentes disciplinas dedicadas al estudio de la tierra.
- Desarrollo de actividades de divulgación a todos los niveles educativos.

El rango de frecuencia de este espectrómetro es de 45 a 870 MHz, con un ancho de banda de 825 MHz.

6.1.1. Hardware

La figura 6.1 es una fotografía de la tarjeta principal del instrumento; el elemento principal de este espectrómetro es el sintonizador de Televisión CD1316 (A) marca Phillips, El sintonizador y todo el sistema es controlado por un microcontrolador de arquitectura RISC Atmel ATMEGA16 (B), en dicha imagen también se aprecia el amplificador logarítmico AD8307 (D), mezclador SA602 (C), El diagrama básico del instrumento se muestra en la figura 6.2, la señal de la antena en una sola polarización es llevada al sintonizador de televisión, en el sintonizador se convierte la señal a una primera frecuencia intermedia de 37.7 MHz, la información del canal que debe ser

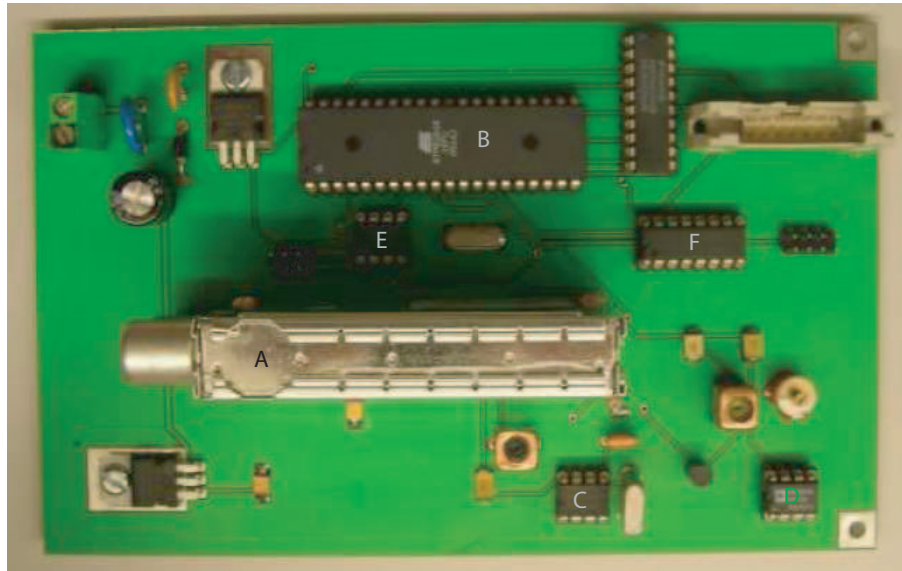


Figura 6.1: Tarjeta del espectrómetro, en la imagen se ven los principales componentes, A: sintonizador CD1316, B: Microcontrolador ATmega16, C: SA602, D: Detector logarítmico AD8307, E: memoria EEPROM, F: MAX232

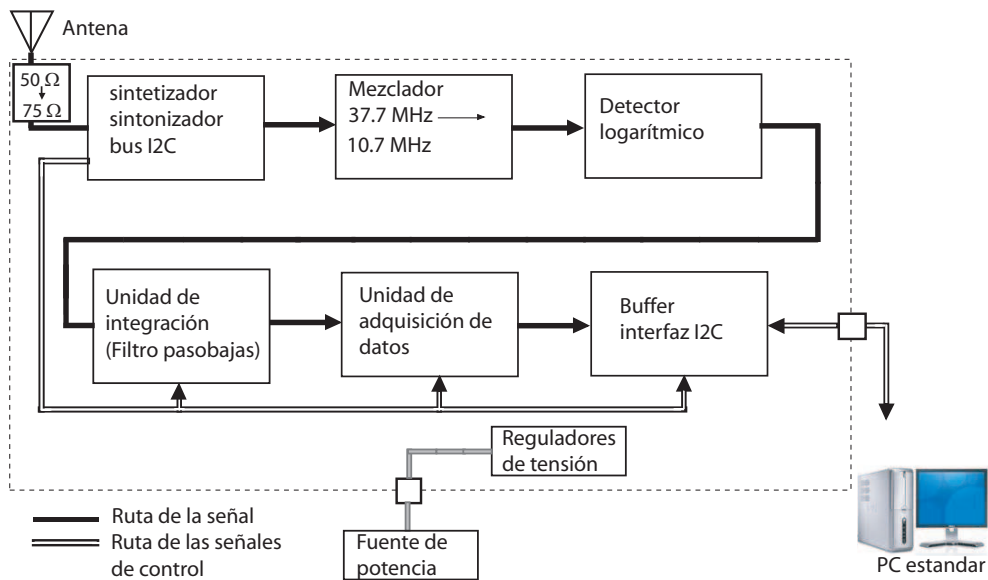


Figura 6.2: Diagrama básico del radio espectrómetro CALLISTO

Parámetro	Valor y unidad
Rango de frecuencia	45MHz...870MHz
Resolución en frecuencia	62.5 KHz
Ancho de banda por canal	300KHz (-3dB)
Rango dinámico	-100dBm...-10dBm
Fuente de alimentación	8V.../0.25A, nominal 12V
Parámetros COM (puerto serie)	115200, 8 bits, sin paridad
Peso	800 gramos
Dimensiones	ancho=110 mm, altura=80 mm

Cuadro 6.1: Parámetros importantes del espectrómetro CALLISTO

sintonizado se envía desde la PC al microcontrolador, este a través del bus de comunicación I2C envía la información al sintonizador que reprograma el oscilador local. En el apéndice A se presentan los diagramas electrónicos del instrumento. La señal de la primera frecuencia intermedia es acoplada con un transformador 1:1 e introducida a otra etapa de mezclado. La figura A.2 es el diagrama de la etapa de segunda frecuencia intermedia (IF2), el circuito integrado SA602 de doble función mezclador-oscilador es el elemento principal de esta etapa, la señal de salida de este mezclador es de 10.7 MHz. A la salida de IF2 se encuentra un filtro cerámico con una frecuencia central de 10.7MHz y un ancho de banda de 300KHz, luego de ser filtrada la señal es amplificada. La última etapa por la que pasa la señal antes de ser muestreada es el detector logarítmico, el diagrama de esta etapa se muestra en la figura A.3, el circuito integrado usado es el AD8307 que genera un voltaje de salida de 25mV/dB.

El rango total del instrumento es de 45-870 MHz. Un canal individual tiene un ancho de banda de 300 KHz y es sintonizado por el software de control en pasos de 62.5 KHz, el número de canales por programa de observación es de 1 a 250 canales, el tiempo de muestreo por canal es de 0.2 segundos. La señal de reloj para realizar el muestreo de los canales puede ser interno o externo, el interno es derivado del ciclo reloj del procesador ATmega16, también puede usarse un señal externa de 1 MHz con nivel TTL.

El diagrama de la figura A.5 del apéndice A es la sección del microcontrolador de arquitectura RISC ATmega16. El microcontrolador se comunica con la computadora a través de del puerto serial, recibe información para controlar todo el proceso de medición del instrumento, el dato para la selección del canal es enviado por el bus I2C al sintonizador. Haciendo uso del módulo PWM se genera un voltaje promedio para controlar la ganancia del sintonizador, la salida de la señal PWM es en el pin PD7. El dispositivo tiene ocho canales de conversión analógico a digital (ADC) de 10 bits, en el

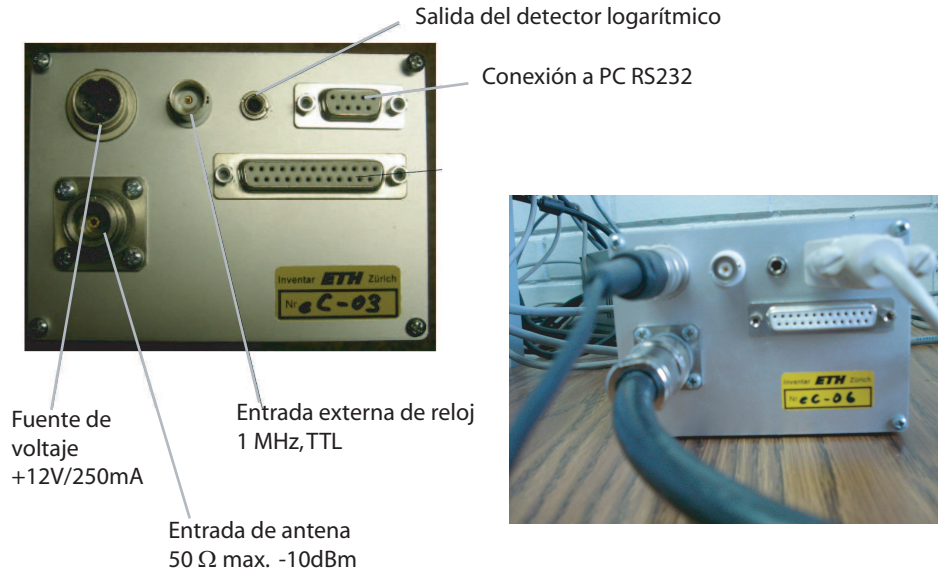


Figura 6.3: Fotografía del instrumento, se muestran los principales conectores. la imagen de la derecha con código ec-06 es el instrumento que está instalado en el Instituto de Geofísica.

canal 0, pin PA0 se realiza la conversión del voltaje de salida del detector logarítmico. El valor del voltaje de control de ganancia es muestreado en el canal 2, pin PA2, otra señal que es muestreada es el voltaje del emisor del transistor BF199 que se muestra en la figura A.2 del apéndice A. Para conocer el voltaje de polarización, se realiza la conversión a digital de este mediante un divisor de voltaje de relación 10/37.

6.1.2. Software

Desde la computadora se envían los comandos al instrumento, también se reciben los datos de las mediciones realizadas, el espectrómetro es proporcionado con un programa para operarlo, se llama *callisto.exe* y opera en Windows 2000 y XP. La computadora en donde corre el programa debe estar sincronizada a la hora universal y tiene que actualizarse a través de un servidor por internet o con un GPS.

El programa genera cada 15 minutos archivos en formato FITS, además genera gráficas con los datos recibidos, estas gráficas son de tres tipos:

- En la figura 6.5 se ve una gráfica en donde se observa un solo canal, en el programa de frecuencia se elige que canal se desea y los valores mostrados son dígitos del convertidor ADC, los dígitos son proporcionales al logaritmo de la potencia de la IF2.

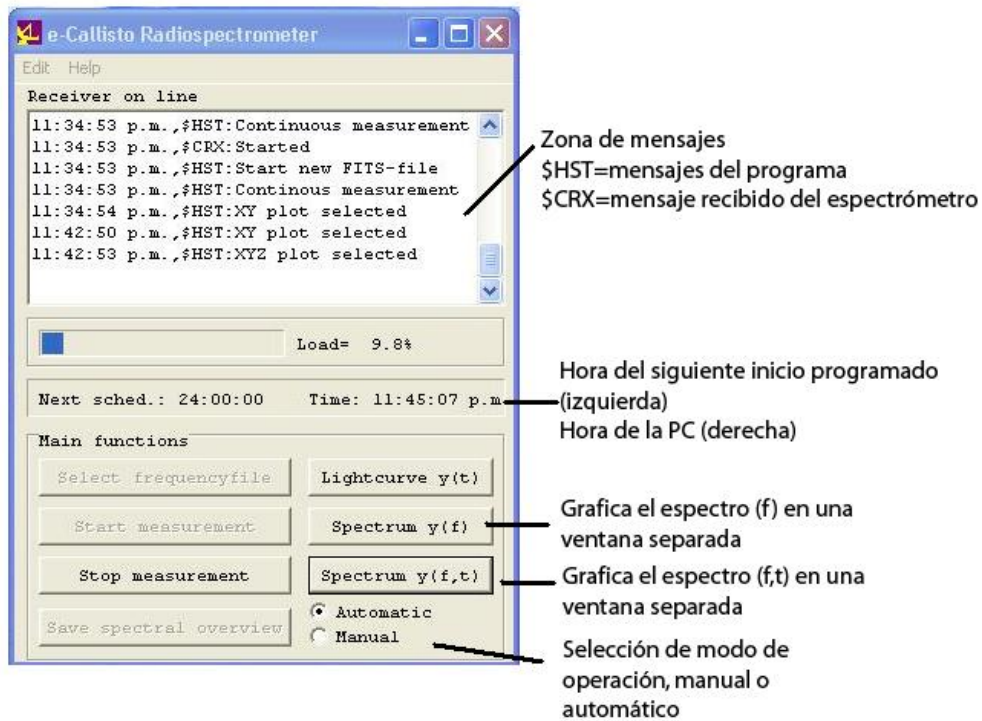


Figura 6.4: Ventana principal del programa callisto.exe

- En la figura 6.6 se muestra el espectro generado por el programa, muestra el resultado actual de la intensidad de la señal recibida contra la frecuencia del canal.
- La figura 6.7 muestra lo que se conoce como el espectro dinámico, es un espectro de frecuencia que involucra al tiempo; en el eje vertical se tiene la frecuencia y en el horizontal el tiempo, el tiempo está expresado en número de barridos, para obtener el tiempo físico se multiplica el número de barridos por la base de tiempo (0.25sec.) que se indica en el paréntesis cuadrado. La intensidad de cada canal se expresa con un color, el color puede ser elegido con los controles localizados a la derecha de la figura, a la intensidad de la señal se le puede restar un fondo fijo para observar a partir de cierto nivel de potencia.

Los parámetros de operación del instrumento son almacenados en un ar-

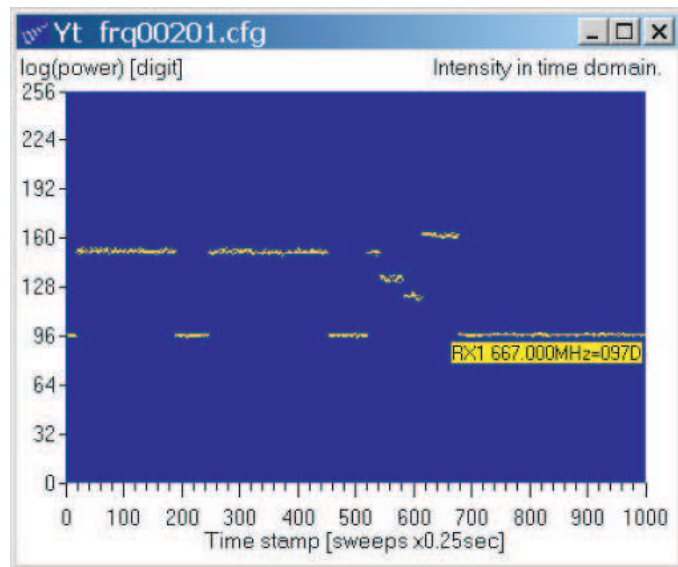


Figura 6.5: Gráfica de la intensidad de un canal contra el tiempo

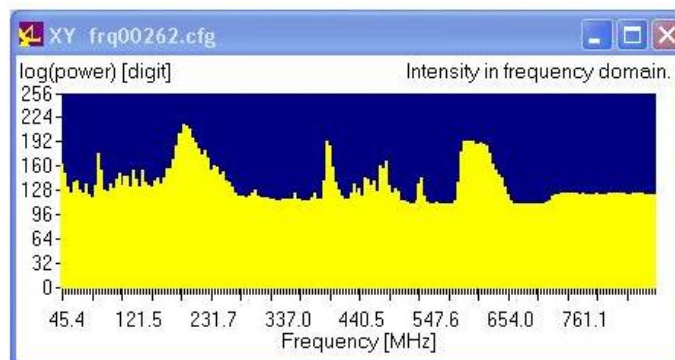


Figura 6.6: Gráfica que genera el programa principal, es un espectro donde se puede observar en el eje vertical la intensidad y la frecuencia en el horizontal

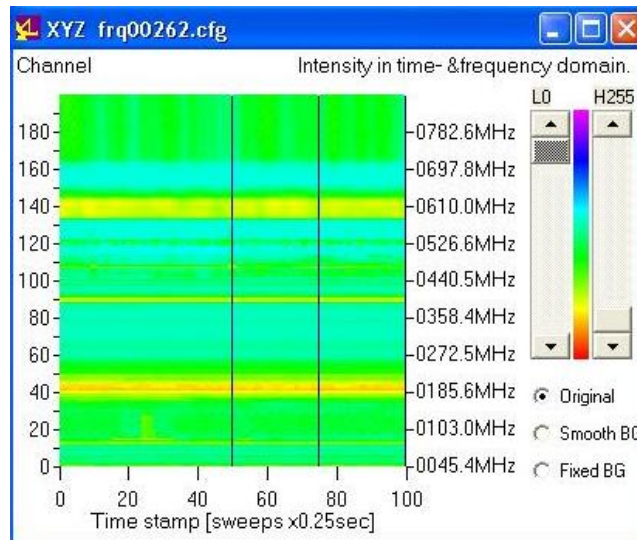


Figura 6.7: Espectro dinámico generado por el programa principal

chivo de texto, en este archivo de configuración se encuentran los datos de identificación y operación del instrumento. En lo que corresponde a la identificación del instrumento se indica el nombre de la institución y las coordenadas geográficas. También indica la ruta de la carpeta donde se almacenan los archivos FITS, y el nombre del archivo del plan de frecuencias para el barrido de los canales. En la página 76 se muestra este archivo, puede ser editado fácilmente para cambiar cualquier parámetro.

En la figura 6.4 se muestra la ventana principal del programa, se ve que es posible la elección de dos modos de operación, manual o automático. En el modo automático es necesario configurar el archivo *scheduler.cfg*, en este archivo, cuyo formato se muestra en la página 77, se indica la hora de inicio y la hora del fin de la observación.

6.2. Primeras observaciones

El instrumento está operando actualmente en el instituto de Geofísica, se ha llegado a la conclusión que el lugar no es el adecuado para mantener en operación el espectrómetro. Debido a que el rango de operación del instrumento se traslapa con el espectro radioeléctrico usado para distintos usos

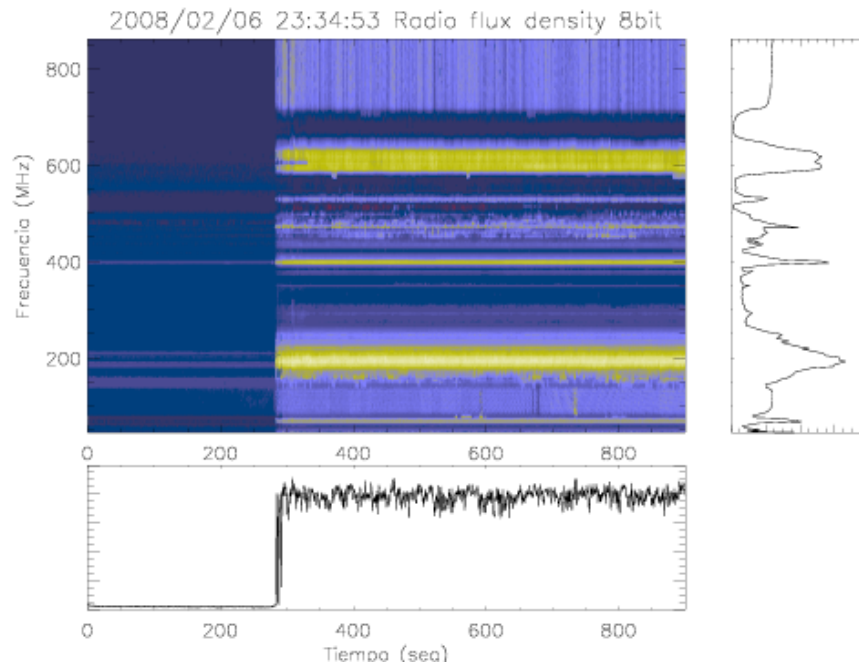


Figura 6.8: Espectro dinámico de una prueba realizada con la antena colocada en el techo del Instituto de Geofísica, el rango de frecuencias observado es de 45 a 870 MHz

comerciales se hace difícil la observación de algún estallido solar. La principal interferencia son los canales de televisión en VHF y UHF, también se tiene las estaciones de radio de FM. En la figura 6.8 se muestra el espectro dinámico de una observación de 15 minutos realizada en el Instituto de Geofísica en Ciudad Universitaria.

Se planea instalar de forma permanente el espectrómetro en el volcán Sierra Negra que está localizado en el estado de Puebla, este lugar tiene una altura de 4550 metros sobre el nivel del mar. Debido a que las instalaciones no están terminadas, el espectrómetro continuará en Ciudad Universitaria. Se transportó el instrumento a Sierra Negra para observar el nivel de interferencia que existe en ese lugar. En la figura 6.9 se muestra el espectro de la prueba que se realizó, la interferencia es mucho menor, existen amplios intervalos de frecuencia donde no se tiene ningún tipo de interferencia. En

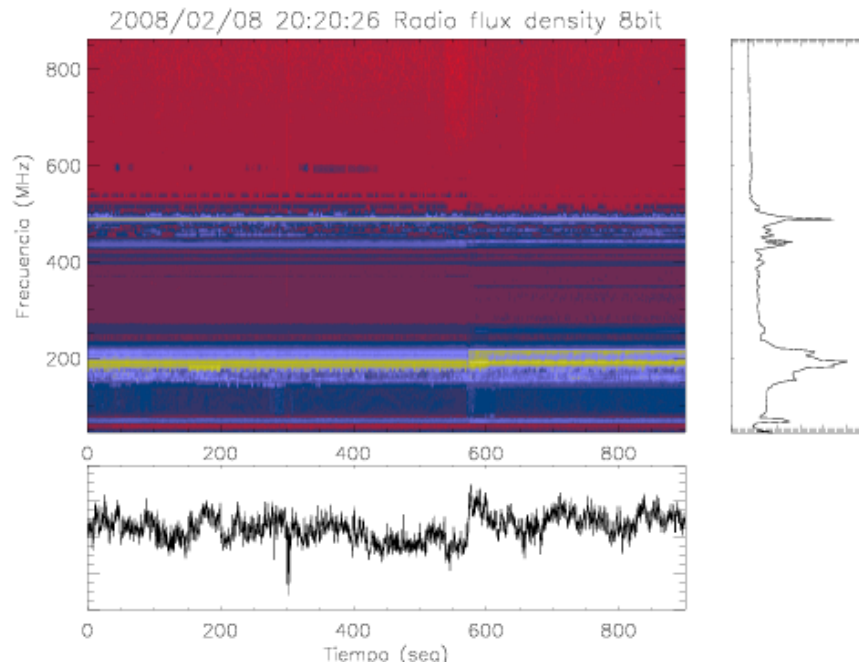


Figura 6.9: Espectro dinámico de la prueba realizada en el volcán, el rango de frecuencias observado es de 45 a 870 MHz

el rango correspondiente a la radiodifusión de FM se encuentra interferencia, el otro rango en donde se encuentra interferencia es entre 430 a 500 MHz. Se puede concluir que el volcán Sierra Negra es un sitio adecuado para la instalación del espectrómetro CALLISTO, hay un amplio rango de frecuencias libres de interferencia, y las zonas en donde existe interferencia son de menor intensidad comparadas con las que se tienen en el Instituto de Geofísica. Debido a que estamos a unos 2 años del máximo del ciclo solar de 11 años, por el momento no son muy comunes los estallidos solares que se desean observar. La figura 6.10 muestra como se vería un fenómeno observado por CALLISTO, es un estallido solar tipo II que fue observado por un instrumento similar instalado en Siberia Rusia

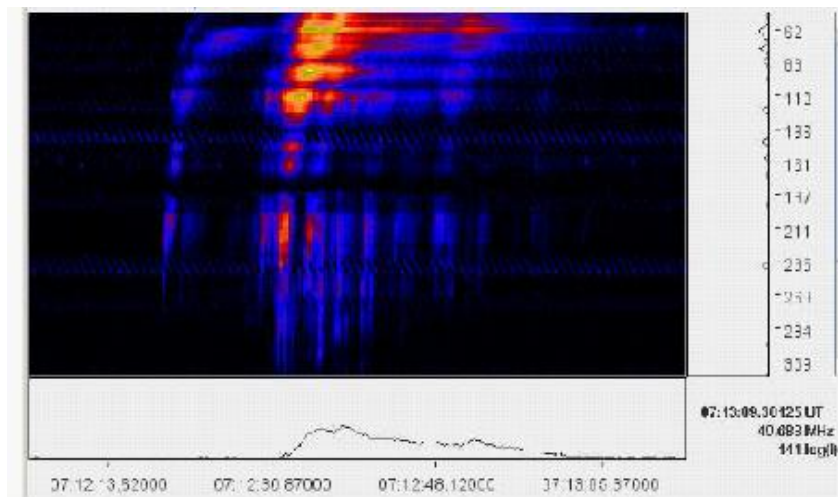


Figura 6.10: Estallido solar tipo II observado por un CALLISTO en Siberia, Rusia.

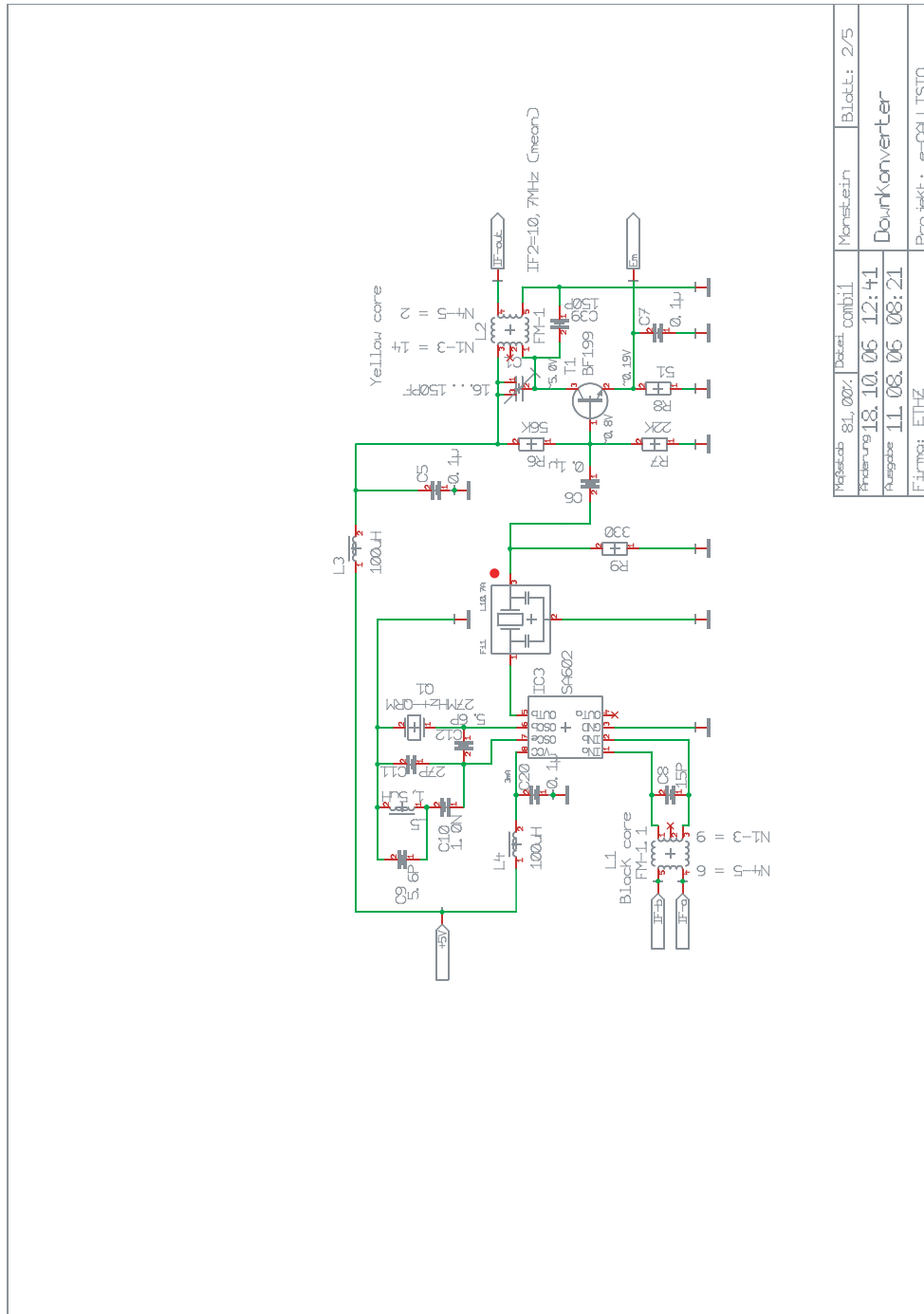
Capítulo 7

Conclusiones

Al poner en operación el instrumento CALLISTO se desarrolló el conocimiento y la técnica para construir un radiotelescopio, en particular un espectrómetro solar, al hablar del radiotelescopio nos referimos a todo el sistema en conjunto, es decir, el receptor, la antena, conectores y cables de conexión entre antena y receptor. Se entendió perfectamente el funcionamiento del receptor y de la antena de banda ancha necesaria para el sistema. Para lograr un buen funcionamiento, es necesario entender como opera cada elemento del radiotelescopio porque los parámetros de un elemento impone restricciones en los parámetros de otros, por ejemplo dependiendo de la sensibilidad y el ancho de banda del receptor se debe elegir una antena en específico. Una parte esencial del radiotelescopio es la antena, en este caso se diseñó y construyó con éxito una del tipo logarítmica periódica. Debido a las condiciones climatológicas (fuertes vientos y nevadas) que imperan en el lugar definitivo en que se instalará dicha antena se eligió construirla con materiales resistentes a esas condiciones extremas. Entre otras cosas necesarias se construyó la fuente de alimentación y finalmente se puso en marcha el sistema completo. Ahora se cuenta con un instrumento adecuado para realizar observaciones solares en una longitud geográfica de 99.1234, *W* y latitud 19.1234 *N*. Con esto el Radiobservatorio Solar del IGEF de la UNAM está integrado con los otros espectrómetros similares de los países que participan en el programa y compartiendo los datos de las observaciones a través de la red.

Apéndice A

Diagramas del espectrómetro CALLISTO



MikroLab 83, 00%	Datens. combi1	Monstein	Blatt: 2/5
Änderung 18. 10. 06 12:41		DownKonverter	
Ausgabe 11. 08. 06 08:21			
Firma: ETHZ		Projekt: e-CALLISTO	

Figura A.2: Diagrama de la segunda etapa de frecuencia intermedia, FI=10.7 MHz, se usa un filtro cerámico para filtrar la señal y después se amplifica.

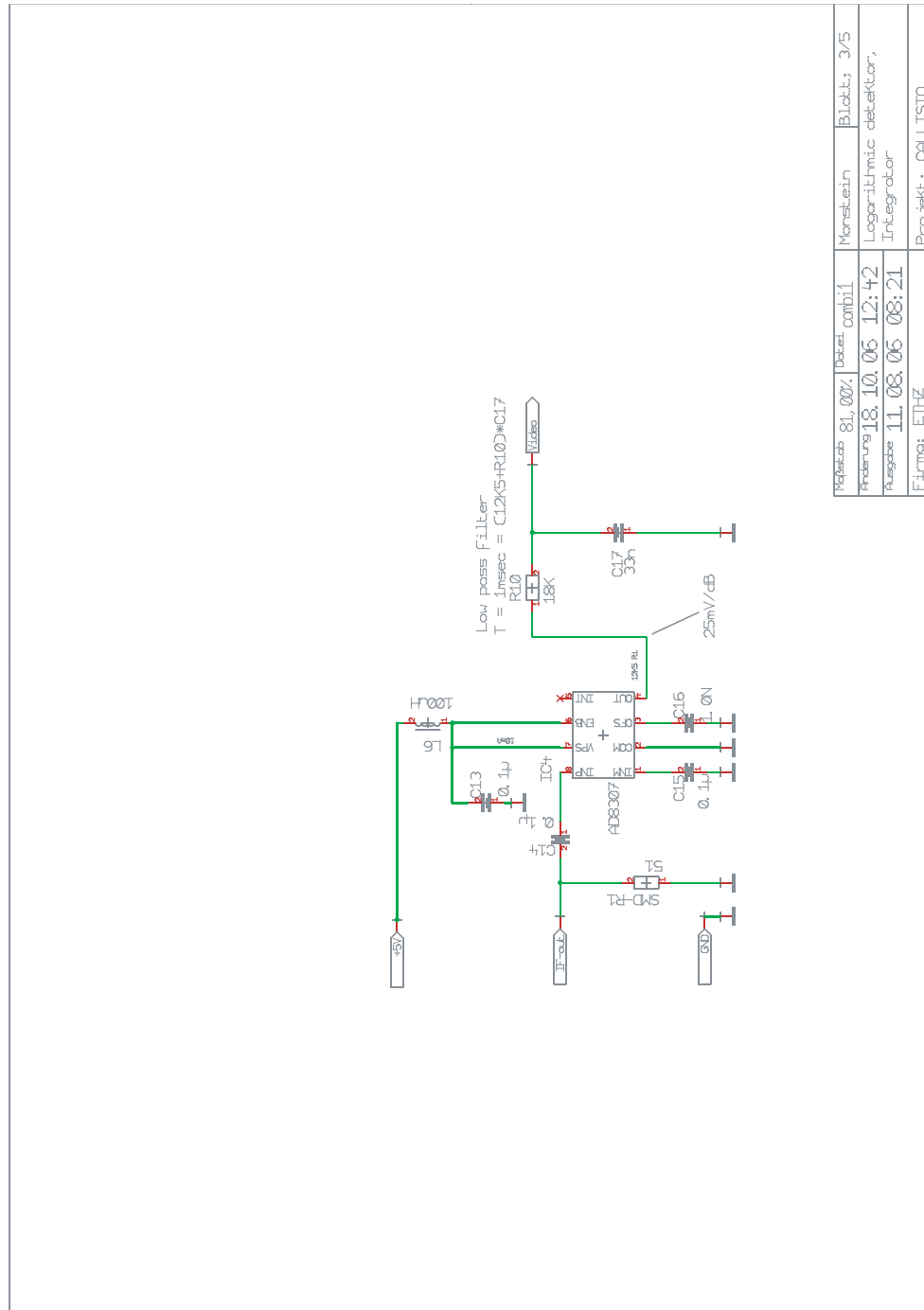


Figura A.3: Diagrama del detector logarítmico e integrador (filtro paso bajas).

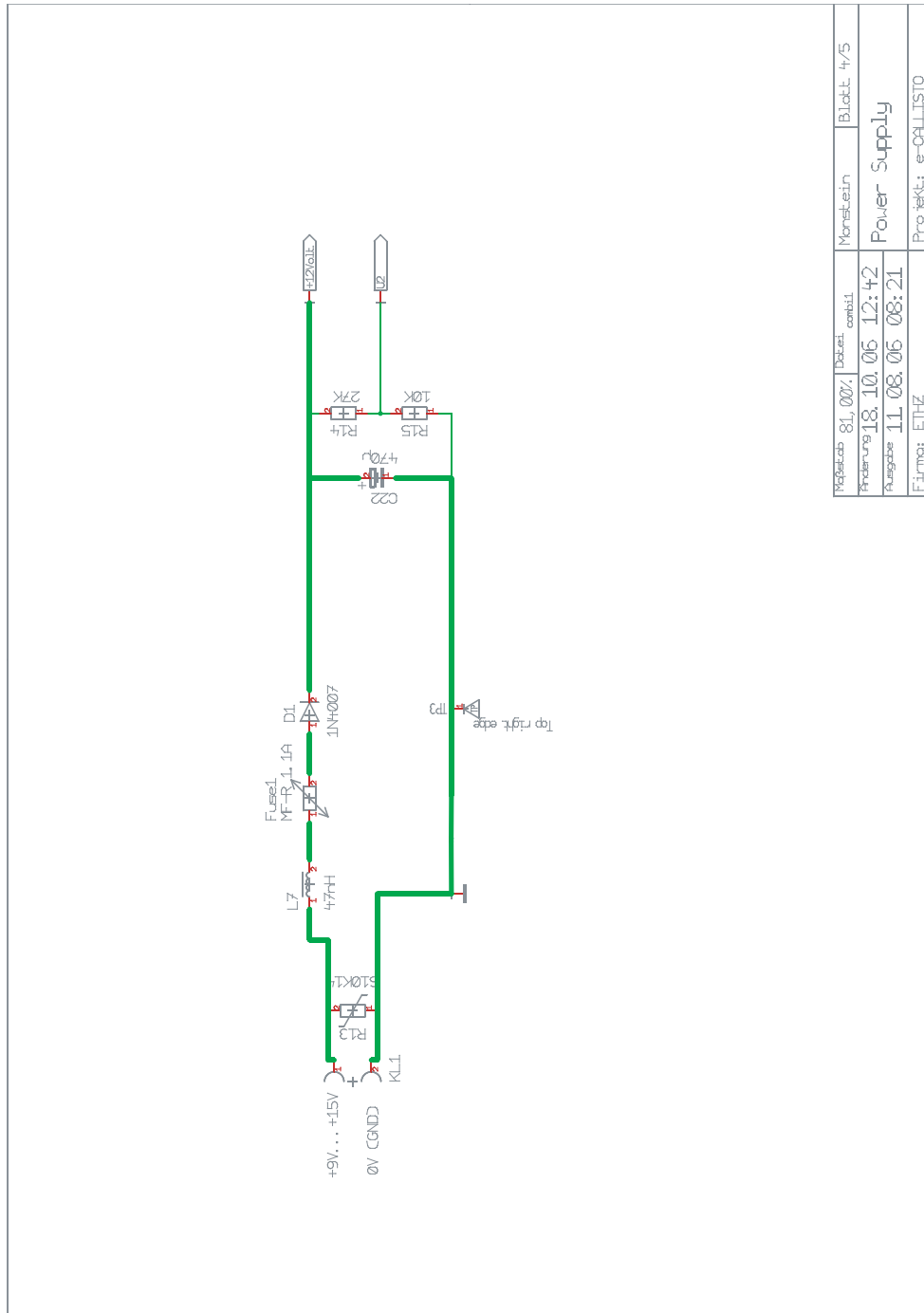


Figura A.4: Etapa de acondicionamiento de la fuente de voltaje, la función del diodo D1 es para proteger el instrumento contra una polarización inversa.

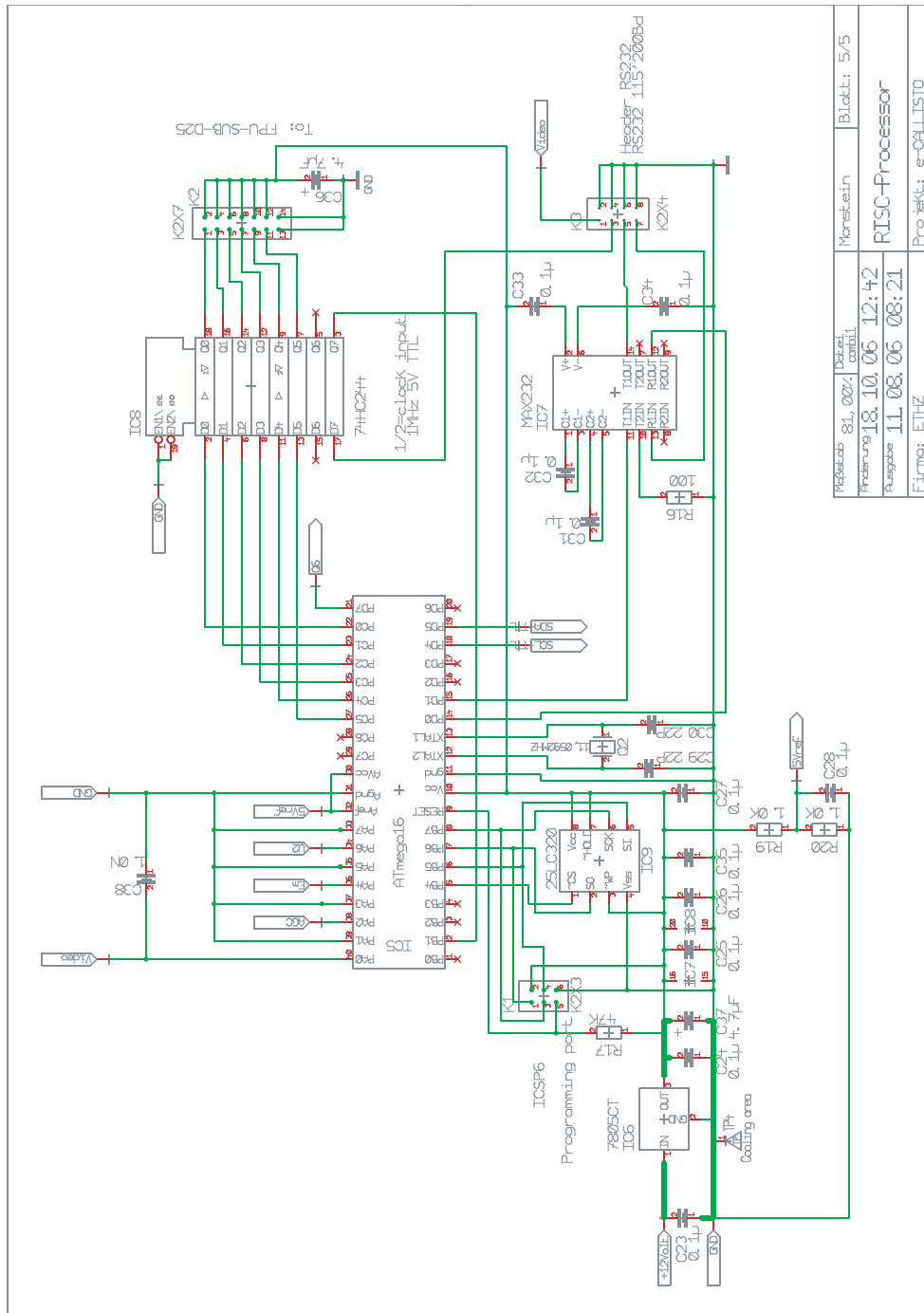


Figura A.5: Diagrama de la etapa del procesador RISC, la comunicación con la memoria EEPROM 25LC320 es a través del bus I2C

Apéndice B

Archivos de configuración

En éste apéndice se presenta el formato de los archivos de texto que son necesarios para la operación del espectrómetro CALLISTO, son tres archivos de texto que se enumeran a continuación:

- El archivo de nombre *callisto.cfg* es el archivo donde se configura el instrumento, editando este archivo se puede seleccionar parámetros como la ganancia del sintonizador ([*agclevel*]), el archivo en donde está el plan de frecuencias para hacer el barrido de frecuencias ([*frqfile*]), el modo de operación del instrumento ya sea en modo manual o en modo automático y muchos otros parámetros.
- En el archivo de nombre *scheduler.cfg* se configura el tiempo para que el instrumento inicie o deje de operar, este archivo es útil durante la operación en modo automático, que es el modo que se usa usualmente.
- El archivo de texto que contiene el plan de frecuencias puede tener cualquier nombre, dependiendo del número de canales que se está observando en un barrido, puede tener 1 a 250 canales, el CALLISTO-México está operando con 200 canales. En este archivo se configura el número de barridos por segundo.


```

/*-----*/
/* (C) Copyright Institute of Astronomy ETHZ 8092 Zuerich Switzerland */
/*-----*/
/* Programname: callisto.cfg */
/* */
/* Revision: V1.5      Date: 20.10.2006      Autor: Chr. Monstein */
/* */
/* Purpose: Configuration file Radiospectrometer CALLISTO */
/* */
/* Editor: Notepad or any other ASCII-Editor */
/*-----*/

// Created by: Chr. Monstein 05.05.2003
// Updated by: Chr. Monstein 20.10.2006 e-Callisto
// RCU, receiver control unit
[rxcomport]=COM1           // COM1 .... COM8, office Monstein=COM3/7, Laptop=COM1
[rxbaudrate]=115200       // see manual CALLISTO, 9600, 19200, 38400, 57600 or 115200
[observatory]=12         // CALLISTO=12
[instrument]=UNAM        // instrument code -> filename_
[origin]=Mexico_city     // Place of instrument ETH_Zurich_Switzerland, NRAO_Green_Ban
NRA
[longitude]=W,99.1234    // default geographical longitude in degree
[latitude]=N,19.1234    // default geographical latitude in degree
[height]=416.5          // default meter above sealevel
[clocksource]=1         // RISC-level: 0=software, 1=internal, 2=external
[filetime]=900          // time periode for one single raw-file (in seconds)
[frqfile]=frq00260.cfg  // default frequency program
[focuscode]=59        // default focuscode
[mmode]=3               // default continuous recording
[ytbuflen]=1000         // bufferlength of light curve plot
[xybuflen]=2000         // bufferlength of frequency domain plot
[xyzbuflen]=20000       // bufferlength of frequency-time domain plot
[timerinterval]=30     // global timing interval [msec]
[timerpreread]=2       // timer to prepare stop-process via scheduler [5sec]
[timeouthexdata]=1000  // timer to empty all buffers after stop [2000msec]
[fitsenable]=1         // 0=no FITSfile, 1=FITS write On
[datapath]=c:\Data\    // default datafile path
[logpath]=c:\log\      // default logfile path
[low_band]=171.0       // VHF band III barrier (MHz)
[mid_band]=450.0       // UHF band IV barrier (MHz)
[chargepump]=1         // charge pump: 0=false=off, 1=true=on
[agclevel]=150         // PWM level for tuner AGC 50...255, default 220

```

```
/*-----*/
/* (C) Copyright Institute of Astronomy ETHZ 8092 Zuerich Switzerland */
/*-----*/
/* */
/* File: SCHEDULER.CFG      Revision: 04, 26.11.2004  Chr. Monstein */
/* */
/*-----*/
/* */
/* Time-scheduler describes what has when to be done on CALLISTO */
/* */
/*-----*/

/* Created by: Chr. Monstein    29.10.2002  initial experients
/* Updated by: Chr. Monstein    07.11.2002  reviewd version
/* Updated by: Chr. Monstein    03.02.2002  reviewd version
/* Updated by: Chr. Monstein    19.09.2003  some minor text changes & focuscode added
/* Updated by: Chr. Monstein    26.11.2004  integartion deleted

/* Each schedule-entry is composed of:
/* - Starttime hh:mm:ss (UT) + delimiter
/* - focuscodes decimal (63..01) to be applied + delimiter
/* - Planned measurement-mode (0...Z)
/* - additional comment
/* each entry will be repeated automatically every day
/* empty lines are allowed to separate diffent tasks

14:15:00,59,3
24:00:00,59,0
```

```
/*-----*/
/* (C) Copyright Institute of Astronomy ETHZ 8092 Zurich */
/*-----*/
/* Programname: FRQ00260.cfg */
/* */
/* Revision: V1.3 Date: 16.08.06 Autor: HB9SCT */
/* */
/* */
/* Purpose: Frequencyprogram for CALLISTO (SMART-1 & EME) */
/* */
/*-----*/
```

```
[target]=CALLISTO
[number_of_measurements_per_sweep]=200
[number_of_sweeps_per_second]=4
```

```
[external_lo]=0.0
```

```
[0001]=171,0
[0002]=171.395,0
[0003]=172.79,0
[0004]=174.185,0
[0005]=175.58,0
[0006]=176.975,0
[0007]=178.37,0
[0008]=179.765,0
[0009]=181.160,0
[0010]=182.555,0
[0011]=183.950,0
[0012]=185.345,0
[0013]=186.740,0
[0014]=188.135,0
[0015]=189.530,0
[0016]=190.925,0
[0017]=192.320,0
[0018]=193.715,0
[0019]=195.110,0
[0020]=196.505,0
[0021]=197.900,0
[0022]=199.295,0
[0023]=200.690,0
[0024]=202.085,0
[0025]=203.480,0
[0026]=204.875,0
[0027]=206.270,0
[0028]=207.665,0
[0029]=209.060,0
[0030]=210.455,0
[0031]=211.850,0
[0032]=213.245,0
[0033]=214.640,0
```

[0034]=216.035,0
[0035]=217.430,0
[0036]=218.825,0
[0037]=220.220,0
[0038]=221.615,0
[0039]=223.010,0
[0040]=224.405,0
[0041]=225.800,0
[0042]=227.195,0
[0043]=228.590,0
[0044]=229.985,0
[0045]=231.380,0
[0046]=232.775,0
[0047]=234.170,0
[0048]=235.565,0
[0049]=236.960,0
[0050]=238.355,0
[0051]=239.750,0
[0052]=241.145,0
[0053]=242.540,0
[0054]=243.935,0
[0055]=245.330,0
[0056]=246.725,0
[0057]=248.120,0
[0058]=249.515,0
[0059]=250.910,0
[0060]=252.305,0
[0061]=253.700,0
[0062]=255.095,0
[0063]=256.490,0
[0064]=257.885,0
[0065]=259.280,0
[0066]=260.675,0
[0067]=262.070,0
[0068]=263.465,0
[0069]=264.860,0
[0070]=266.255,0
[0071]=267.650,0
[0072]=269.045,0
[0073]=270.440,0
[0074]=271.835,0
[0075]=273.230,0
[0076]=274.625,0
[0077]=276.020,0
[0078]=277.415,0
[0079]=278.810,0
[0080]=280.205,0
[0081]=281.600,0
[0082]=282.995,0
[0083]=284.390,0
[0084]=285.785,0

[0085]=287.180,0
[0086]=288.575,0
[0087]=289.970,0
[0088]=291.365,0
[0089]=292.760,0
[0090]=294.155,0
[0091]=295.550,0
[0092]=296.945,0
[0093]=298.340,0
[0094]=299.735,0
[0095]=301.130,0
[0096]=302.525,0
[0097]=303.920,0
[0098]=305.315,0
[0099]=306.710,0
[0100]=308.105,0
[0101]=309.500,0
[0102]=310.895,0
[0103]=312.290,0
[0104]=313.685,0
[0105]=315.080,0
[0106]=316.475,0
[0107]=317.870,0
[0108]=319.265,0
[0109]=320.660,0
[0110]=322.055,0
[0111]=323.450,0
[0112]=324.845,0
[0113]=326.240,0
[0114]=327.635,0
[0115]=329.030,0
[0116]=330.425,0
[0117]=331.820,0
[0118]=333.215,0
[0119]=334.610,0
[0120]=336.005,0
[0121]=337.400,0
[0122]=338.795,0
[0123]=340.190,0
[0124]=341.585,0
[0125]=342.980,0
[0126]=344.375,0
[0127]=345.770,0
[0128]=347.165,0
[0129]=348.560,0
[0130]=349.955,0
[0131]=351.350,0
[0132]=352.745,0
[0133]=354.140,0
[0134]=355.535,0
[0135]=356.930,0

[0136]=358.325,0
[0137]=359.720,0
[0138]=361.115,0
[0139]=362.510,0
[0140]=363.905,0
[0141]=365.300,0
[0142]=366.695,0
[0143]=368.090,0
[0144]=369.485,0
[0145]=370.880,0
[0146]=372.275,0
[0147]=373.670,0
[0148]=375.065,0
[0149]=376.460,0
[0150]=377.855,0
[0151]=379.250,0
[0152]=380.645,0
[0153]=382.040,0
[0154]=383.435,0
[0155]=384.830,0
[0156]=386.225,0
[0157]=387.620,0
[0158]=389.015,0
[0159]=390.410,0
[0160]=391.805,0
[0161]=393.200,0
[0162]=394.595,0
[0163]=395.990,0
[0164]=397.385,0
[0165]=398.780,0
[0166]=400.175,0
[0167]=401.570,0
[0168]=402.965,0
[0169]=404.360,0
[0170]=405.755,0
[0171]=407.150,0
[0172]=408.545,0
[0173]=409.940,0
[0174]=411.335,0
[0175]=412.730,0
[0176]=414.125,0
[0177]=415.520,0
[0178]=416.915,0
[0179]=418.310,0
[0180]=419.705,0
[0181]=421.100,0
[0182]=422.495,0
[0183]=423.890,0
[0184]=425.285,0
[0185]=426.680,0
[0186]=428.075,0

[0187]=429.470,0
[0188]=430.865,0
[0189]=432.260,0
[0190]=433.655,0
[0191]=435.050,0
[0192]=436.445,0
[0193]=437.840,0
[0194]=439.235,0
[0195]=440.630,0
[0196]=442.025,0
[0197]=443.420,0
[0198]=444.815,0
[0199]=446.210,0
[0200]=450.000,0

Apéndice C

Microcontrolador de arquitectura RISC ATmega16

El microcontrolador ATmega16 es de arquitectura RISC (reducido número de instrucciones). Se resumen sus principales características.

- Microcontrolador de 8 bits.
- Hasta 16 MIPS (millones de instrucciones por segundo).
- 16K bytes de memoria flash.
- 512 bytes de memoria EEPROM.
- 1K byte SRAM.
- Timer 16 bits.
- 8 canales ADC de 10 bits.
- Módulo USART programable
- Interfaz I2C
- 32 salidas programables como entrada o salida.

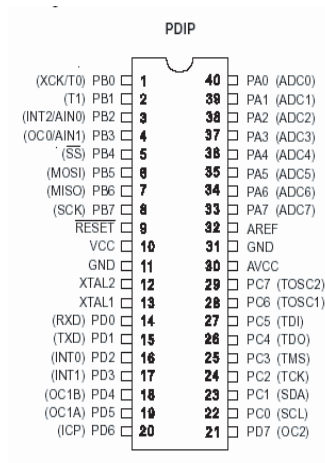


Figura C.1: Configuración de los pines del microcontrolador ATmega16.

Apéndice D

Sintonizador CD1316

El sintonizador CD1316 está diseñado para usarse en aplicaciones de TV de cable digital, aplicación en que se requiere una curva de respuesta plana y bajo nivel de ruido. Existe una versión Europea y otra Americana, la diferencian en la frecuencia intermedia de salida. El espectrómetro CALLISTO utiliza la versión Europea. El sintonizador está equipado con un sistema de sintonización por PLL programable digitalmente a través del bus de comunicación I2C.

- Alto rendimiento y bajo costo.
- Bus I2C, compatible con 400 KHz.
- Rango de voltaje del control automático de ganancia (AGC) de 0 a 3.3 V.
- Respuesta plana en todo el rango de frecuencia.
- Resolución del PLL de 62.5KHz

Lista de abreviaciones

Abreviación	Definición
IGEF	Instituto de Geofísica
RISC	Processor with reduced instruction set
IHY	International Heliospheric Year (2007)
AGC	Automatic Control Gain
ETH	Eidgenössisch Technische Hochschule
LPDA	Log Periodic Dipole Array
ADC	Analog to Digital Converter
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Serial Receiver and Transmitter
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

Bibliografía

- [1] *The ARRL Antenna Book*. 19th edition, August 2000. [cited at p. 40]
- [2] Lluís Jofre Roca Ángel Cardama Aznar. *Antenas*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, segunda edición edition, 2002. [cited at p. -]
- [3] Walter Kennerth Max-Moerbeck Astudillo. *Implementación de un oscilador Gunn en un receptor a 115 GHz, para fines radioastronómicos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, Universidad de Chile, 2005. [cited at p. -]
- [4] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley and Sons, second edition edition, 1997. [cited at p. 42]
- [5] José Antonio García Barreto. *Introducción a Radio Astronomía*. Instituto de Astronomía, UNAM, 1999. [cited at p. -]
- [6] <http://solarphysics.livingreviews.org>. [cited at p. -]
- [7] <http://www.astro.phys.ethz.ch>. [cited at p. -]
- [8] <http://www.astro.phys.ethz.ch/instrument/callisto/ecallisto/applidocs.htm>. [cited at p. -]
- [9] Richard C. Johnson. *Antenna Engineering handbook*. McGraw-Hill, third edition edition, 1993. [cited at p. -]
- [10] Onkgopotse Isaac Madikwane. *Investigation, design, construction and testing broadband antenna for radiotelescope array receiver*. University of Cape Town, 2006, VOLUME =. [cited at p. -]
- [11] Victor Cruz Ornetta. *Diseño y Fabricación de una Antena Log-Periódica 200-1000 MHz*. Electrónica-UNMSM, Diciembre 2005. [cited at p. -]
- [12] Behzad Razavi. *RF Microelectronics*. Prentice Hall, second edition edition, 1998. [cited at p. -]
- [13] Alex G. Smith. *Radioexploración del Sol*. Reverte Mexicana, 1a. edición edition, 1969. [cited at p. -]