

MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CROMOSFERA  
SOLAR EN LA BANDA  $K_{\text{u}}$

JUAN CARLOS TROYA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
PROGRAMA FÍSICA  
SAN JUAN DE PASTO  
MARZO 2013

MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CROMOSFERA  
SOLAR EN LA BANDA  $K_u$

JUAN CARLOS TROYA

Trabajo presentado como requisito previo para optar el título de físico

Director de investigación  
Alberto Quijano Vodniza  
Master en Física Pura

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
PROGRAMA FÍSICA  
SAN JUAN DE PASTO  
MARZO 2013

## **NOTAS DE RESPONSABILIDAD**

“Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor”.

Artículo primero del acuerdo número 324 de octubre 11 de 1966, emanado por el honorable consejo directivo de la Universidad de Nariño.

**Notas de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

Alberto Quijano Vodniza  
Asesor

Juan Flores Moreno  
Jurado

Luis Portilla Salazar  
Jurado

## AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo expresa su agradecimiento a:

Dios por darme la oportunidad y el estar con migo toda mi vida.

Alberto Quijano Vodniza, por su amabilidad al corregir estas notas y haber creído en la realización de este proyecto.

A mi familia por confiar en mí, y darme su amor.

A mis amigos que con su ánimo y apoyo ayudaron en gran medida a la culminación de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A mi familia y todos mis amigos

# **MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CROMOSFERA SOLAR EN LA BANDA KU**

## **RESUMEN**

En este proyecto se pretende medir la amplitud de una señal proveniente del sol, que se encuentra en un ancho de banda entre 11.70- 12.20 Ghz, asociando a esta señal una temperatura de brillo de acuerdo con lo que expresa la ley de Planck. Para lograr el objetivo se construirá un receptor ajustado en la frecuencia radiación, en base de componentes de uso comercial y para llevar un registro en función del tiempo de la señal, se diseñará un programa en el lenguaje LABview.

Una vez construido el sistema completo de medida se deberá caracterizar, dando el grado de confiabilidad de las muestras, y los rangos en que puede ser utilizado; por último se llevará un registro de la temperatura de la radiación del sol con lo cual se realizara un análisis estadístico de los datos y el resultado de la medición será comparado con mediciones previamente realizadas por investigadores, y publicadas en artículos científicos de radioastronomía.

# **TEMPERATURE MEASURING THE SOLAR CHROMOSPHERE AVERAGE Ku - BAND**

## **ABSTRACT**

This project aims to measure the amplitude of a signal from the sun, which is in a bandwidth between 11.70-12.20 GHz, associating this signal brightness temperature according to what the law expresses Planck. To achieve the objective set will build a receiver in the radiation frequency, based on commercial components and to track time-dependent signal is design a LabVIEW program language.

After building the complete system should be characterized as giving the degree of reliability of the samples, and ranges that can be used and finally will take a record of the temperature of the sun's radiation thereby undertake a statistical analysis of the data and the measurement result will be compared with measurements made previously by researchers, and scientific articles published in radio astronomy.



# ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	13
<b>1 RADIO EMISIONES</b>	<b>15</b>
1.1 EMISIÓN DE RADIO EN ASTRO-FÍSICA	15
1.2 EL SOL	16
1.2.1 Cromosfera	17
1.2.2 Radio emisiones solares	18
1.3 FUNDAMENTOS DE RADIO ASTRONOMÍA	21
1.3.1 Patrón de radiación	22
1.3.2 Distribución espacial del brillo $P(\theta\phi)$	23
1.3.3 Intensidad de radiación	23
1.3.4 Densidad de flujo	23
1.3.5 Función de transferencia	24
1.4 TEMPERATURA DE LA ANTENA	25
<b>2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL</b>	<b>26</b>
2.1 RADIO TELESCOPIO.	26
2.2 ANTENA	26
2.2.1 Patrón de antena	28
2.2.2 Resolución de la antena	28
2.2.3 Angulo sólido de la antena	29
2.2.4 Eficiencia del haz	29
2.3 SENSOR LNB	29
2.3.1 Figura de ruido (NF)	30
2.4 RADIÓMETRO	30
2.4.1 Buscador de satélites	30
2.4.2 Tarjeta Amplificadora	30
2.4.3 Tarjeta conversor análogo digital	32
2.5 PROGRAMA REGISTRADOR	33
2.6 TEMPERATURA DEL SISTEMA	34
2.7 DENSIDAD DE FLUJO DETECTABLE	35

<b>3</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>36</b>
3.1	TEMPERATURA DE LA MUESTRA . . . . .	36
3.1.1	Ajuste de la curva de calibración . . . . .	38
3.1.2	Angulo solido de la antena . . . . .	39
3.2	CURVA EXPERIMENTAL DE LA ANTENA UTILIZADA . . . . .	41
3.2.1	Area efectiva de la antena . . . . .	44
3.2.2	Temperatura del sistema . . . . .	44
3.3	TEMPERATURA PROMEDIO DEL SOL . . . . .	45
	<b>Conclusiones</b>	<b>47</b>
	<b>Recomendaciones</b>	<b>48</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>50</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Radiación de sincrotrón . . . . .	16
1.2	Cromosfera solar . . . . .	17
1.3	Cromosfera en la línea de K del Ca II . . . . .	18
1.4	Espectro del cuerpo negro del Sol . . . . .	18
1.5	Temperatura del Sol en la banda de radio . . . . .	19
1.6	Variación de la temperatura de las capas solares . . . . .	20
1.7	Potencia detectada por una antena . . . . .	21
1.8	Patrón de radiación coordenadas cartesianas . . . . .	22
1.9	Patrón de radiación coordenadas polares . . . . .	22
1.10	Brillo detectado por una antena . . . . .	24
2.1	Diagrama de bloque de un radio telescopio . . . . .	27
2.2	Antena de tipo offset, RCA . . . . .	27
2.3	Lóbulo principal y secundarios de una antena parabólica . . . . .	28
2.4	Sensor LNB . . . . .	29
2.5	Buscador de satélites . . . . .	30
2.6	Diagrama de la tarjeta amplificadora . . . . .	31
2.7	Etapas de amplificación del radiómetro . . . . .	32
2.8	Etapas de digitalización del radiómetro . . . . .	33
2.9	Sistema completo del radiómetro . . . . .	33
2.10	Panel frontal del instrumento virtual . . . . .	34
3.1	Intensidad de un cuerpo emisor de radiación . . . . .	37
3.2	Objeto puntual . . . . .	37
3.3	Curva de calibración del radio telescopio . . . . .	38
3.4	Antena no apuntada . . . . .	40
3.5	Antena apuntada correctamente . . . . .	41
3.6	Datos experimentales del patrón de antena en azimut . . . . .	42
3.7	Curva de interpolación de datos en azimut . . . . .	42
3.8	Datos experimentales del patrón de antena en altitud . . . . .	43
3.9	Curva de interpolación de datos en altitud . . . . .	43
3.10	Curva registrada por el sistema apuntando al Sol . . . . .	45

# ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Etapa amplificadora	50
ANEXO B. Etapa de digitalización	51
ANEXO C. Fuente de poder	53
ANEXO D. Programa Radio telescopio	55
ANEXO E. Programa ajuste de patrón de antena	56
ANEXO F. Cálculos Estadísticos	57
ANEXO G. Señales de patrón de onda de la antena	61
ANEXO H. Señales de voltaje correspondientes a observaciones solares	81
ANEXO I. Datos de Temperatura de Brillo publicados por NASA	86
ANEXO J. Calibración del radiómetro	87
ANEXO K. Ruido en los amplificadores D.C	89
ANEXO L. Construcción guía de antena	91

## INTRODUCCIÓN

Dentro del universo existen gran cantidad de fuentes emisoras de radio, en las cuales podemos nombrar el centro de la galaxia, los cuásares, los pulsars, la radiación de fondo, el sol. Cada una de estas fuentes para su estudio requieren técnicas diferentes de investigación y observación con las cuales podemos describir los fenómenos asociados a estas emisiones. El sol como fuente proveedora de energía ha sido tema importante en investigaciones de centros muy reconocidos a nivel mundial, ya que de su comprensión se desarrollaran proyectos tan importantes como los viajes espaciales, energías alternativas, o la misma supervivencia de la especie humana. Por su cercanía esta estrella es la única que nos posibilita el estudio de su superficie dejándonos ver la complejidad de las reacciones que allí existen. La tierra como el resto de los planetas se encuentran envueltos en la atmósfera solar lugar donde por la interacción con el campo magnético presenta un comportamiento diferente al mostrado en otras situaciones, ya que esta capa se encuentra a una temperatura más elevada que la existente en su superficie. Una posible explicación de este aumento de temperatura es la propagación de ondas a través del plasma. Estas son llamadas ondas hidromagnéticas u ondas de Alfvén.

En el presente proyecto se pretende detectar la señal perteneciente al aumento de la temperatura solar, utilizando una antena parabólica y un instrumento construido por el investigador, donde su principal componente es un sensor LNB (amplificador de bajo ruido) que detectara la señal proveniente de la cromosfera en la banda de las microondas. La base teórica en que se basa la medición es que la atmósfera solar esta conformada de capas, radiando como un cuerpo negro, donde cada una se encuentra en equilibrio térmico local. El radiómetro sera complementado por un programa diseñado en LABview que llevara un registro de la señal. Una vez terminado el proyecto, el sistema experimental servirá de herramienta para próximas investigaciones referentes a radio astronomía, dejando enlaces con otras ramas de la ciencia, que nos ayuden al conocimiento del universo.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Diseñar y construir un prototipo de radio telescopio, que permita cuantificar la temperatura de brillo de la cromosfera solar en la banda KU (microondas).

### **ESPECÍFICOS**

-Construir el instrumento y caracterizar el ruido presente en la señal, así como los valores de error en las medidas de voltaje y temperatura de brillo entregados por el sistema de monitoreo.

-Realizar un registro de la señal, que permita obtener la medida de temperatura de brillo, por un periodo de un mes.

-Interpretar física y matemáticamente los resultados experimentalmente obtenidos y compararlos al final con resultados publicados en artículos de NASA.

# Capítulo 1

## RADIO EMISIONES

En este capítulo se hablara en forma general sobre las fuentes astronómicas emisoras de radio y se describirá la forma como hace la radio astronomía para su estudio, también hablaremos en forma breve sobre la estructura solar, así como los procesos energéticos desarrollados, en el estado actividad solar. Al final del capitulo se reseñara sobre los fundamentos en que se centra la detección de las señales procedentes de las emisiones estelares.

### 1.1 EMISIÓN DE RADIO EN ASTRO-FÍSICA

Para el estudio en radio astronomía se hace uso del elemento más abundante en el universo teniendo en cuenta su tres estados. El hidrógeno atómico (HI), El hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>), En el hidrógeno ionizado (HII), cada uno de estos estados tiene propiedades físicas diferentes que permiten estudiar su comportamiento, y de extraer de ellos información.

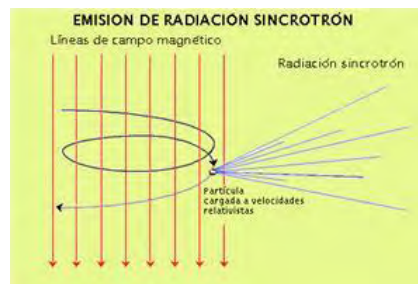
El estado que nos interesa conocer es le hidrógeno ionizado, en este los protones y los electrones se encuentran libres, formando lo que se llama un plasma, donde las partículas pueden interaccionar en tres formas diferentes:

**Pueden recombinarse entre ellos**, de manera que se unen al átomo devolviéndolo a su estado neutro. Este proceso provoca la emisión de radiación continua, ya que la cantidad de radiación emitida no es fija, sino que depende de la energía inicial del electrón que se recombina.

**Radiación de frenado.** Cuando un electrón se acerca a un átomo ionizado, es decir, cargado eléctricamente, se produce una interacción eléctrica entre ambos, que provoca un cambio en la trayectoria o velocidad del electrón. Esta variación tiene como consecuencia la emisión de la radiación, también denominada bremsstrahlung o emisión libre-libre. La radiación emitida será continua, ya que estas variaciones de trayectoria o

velocidad no tienen unos valores determinados, por lo que los fotones emitidos barrerán un amplio rango del espectro. La intensidad y frecuencia de esta radiación depende de la agitación térmica a la que estén sometidos los átomos y los electrones del gas, por lo que se trata también de una radiación térmica, esto ocurre precisamente alrededor de las estrellas, en las nebulosas, en los cúmulos estelares o, incluso, en planetas como Júpiter las interacciones entre ellas pueden producir emisión continua en el rango de las radiofrecuencias.

**Radiación sincrotrón** radiación no térmica que dependen de la interacción de las partículas cargadas con los campos magnéticos. Cuando una partícula cargada entra en un campo magnético experimenta una fuerza que la obliga a trazar círculos o espirales alrededor de las líneas de campo (ver figura 1.1). Por lo tanto, la partícula sufre una aceleración angular que induce la emisión de radiación. En condiciones no relativistas, esta radiación, denominada ciclotrón, y no es suficientemente intensa como para ser relevante en los diferentes escenarios astrofísicos. Sin embargo, cuando la velocidad de las partículas cargadas se aproxima a la velocidad de la luz, éstas emiten un tipo particular de emisión ciclotrón mucho más intensa denominada sincrotrón, esta radiación emitirá gran cantidad de energía y su frecuencia dependerá del campo magnético y de la velocidad de la partícula, pudiendo tomar un rango continuo de valores.



*Figura 1.1: Cuando una Partícula cargada se Mueve a velocidades relativistas e Interacciona con un campo magnético emite la denominada radiación sincrotrón. Fuente wikipedia.org.*

Las fuentes importantes de radiación sincrotrón son los cuásares, supernovas, los pulsar y la estrella en estudio el sol<sup>1</sup>

## 1.2 EL SOL

A causa de su proximidad a la tierra, el Sol es un recurso extraordinario para el estudio de los fenómenos estelares, y de vital importancia ya que su energía, sustenta a casi

<sup>1</sup>Kraus, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd edición, 1986, pág 2-6



todas las formas de vida y determina el clima de la Tierra.

La superficie del sol se encuentra formada por plasma y las reacciones nucleares que en el se presentan, junto con el campo magnético, determinan el comportamiento de la superficie solar, la cual emite gran cantidad de radiación térmica, y una cantidad de radiación no térmica en forma de ondas de radio.

La radiación que nos interesa estudiar se encuentra en la banda de la micro ondas es de origen sincrotrónico, y su emisión se produce a un capa especial del sol, llamada cromosfera.

### 1.2.1 Cromosfera

Su nombre literalmente significa "esfera de color". Se llama así debido a que es de un color rojizo, en contraste con la corona que es prácticamente blanca, y su color es consecuencia debido a que su máximo de emisión se produce en  $H\alpha$  (hidrogeno alfa), a una longitud de onda de 656 nm, lográndose observar unos segundos antes y después de un eclipse total, gracias a que en estos instantes la Luna oculta la fotosfera pero no la cromosfera. (ver figura 1.2)

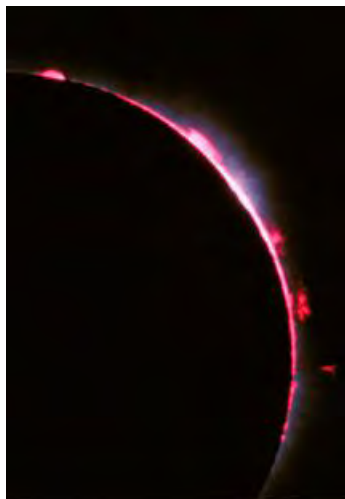


Figura 1.2: La cromosfera aparece como un anillo rojizo justo unos segundos antes y después de un eclipse total. Fuente wikipedia.org.

También se puede observar la Cromosfera completa, en todo el disco solar, con ayuda de un filtro de banda estrecha centrado en la línea H o en las líneas K y del Ca II, en estas se ven grandes superficies más brillantes , llamadas "plages" ("playas") , que coinciden con las regiones activas, alrededor y sobre las manchas solares. La observación en radio

de la cromosfera debe realizarse, en un ancho de banda de 2 a 20 GHz<sup>2</sup>.

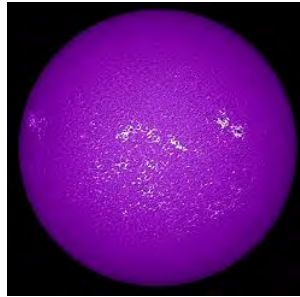


Figura 1.3: Imagen en la línea K del Ca II del disco solar donde se pueden ver as “plages” de la cromosfera. Fuente wikipedia.org.

## 1.2.2 Radio emisiones solares

El sol bajo ciertas condiciones de presión, densidad y temperatura radian ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda. La curva de densidad de radiación del sol se ajusta a un a cuerpo negro a una temperatura de 6000 <sup>0</sup>K, donde su máximo se encuentra en las longitudes de onda correspondientes a la región visible. En la figura 1.4 podemos observar este comportamiento.

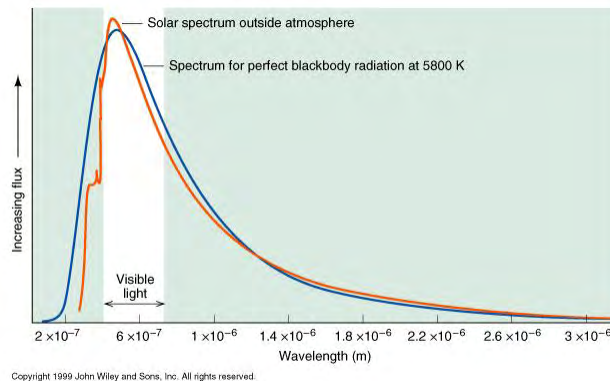


Figura 1.4: Espectro de cuerpo negro del Sol. La línea roja es el espectro observado del Sol y en azul podemos ver el espectro de cuerpo negro que más se aproxima al espectro solar. Según esto podemos decir que la superficie del sol está a unos 6000 grados Kelvin ( $T(K)=T(^{\circ}C)+273$ ). Podemos ver que la mayor parte de la emisión del Sol nos llega en el rango visible. La región radio, la zona derecha de la gráfica es pequeña, pero no despreciable. Fuente wikipedia.org.

<sup>2</sup>G.B. Gelfreikh. Physics of the Solar Active Regions from Radio . Astronomical Observatory of RAS, St.-Petersburg 196140, Rusia, 2002, pág.45

En longitudes de onda mayores el sol presenta un comportamiento como el mostrado en la figura 1.5. En esta se puede observar que la curva del sol se bifurca en dos, una cuando existe actividad solar (existencia de manchas solares) y cuando no es activo, donde los valores de densidad de radiación se ajustan a curvas de cuerpos negros de mayor temperatura. Este aumento de la temperatura es explicado por la propagación de un tipo especial de ondas llamadas ondas de Alfvén que en la teoría magnetohidrodinámica (MHD) constituyen una solución que resulta de introducir una perturbación a las ecuaciones que describen el comportamiento acoplado del plasma y campo magnético <sup>3</sup>.

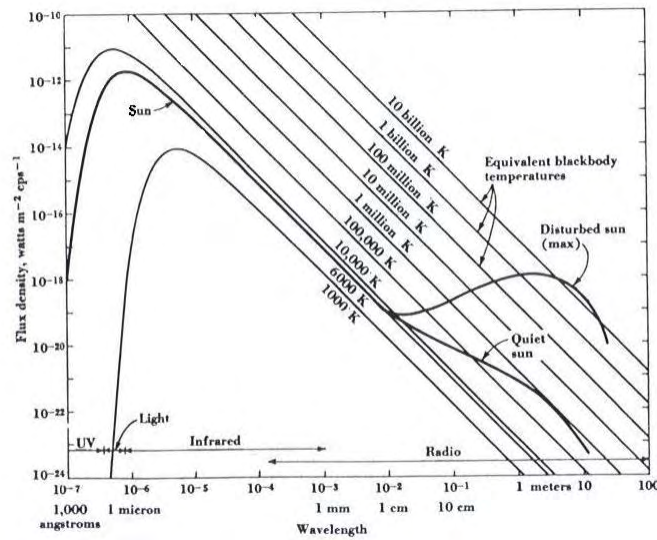


Figura 1.5: Se puede observar el aumento de la temperatura de brillo para longitudes de onda mayores. Fuente KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986, pág 8-45.

La perturbación sobre el plasma hace que se induzca un campo eléctrico, este campo produce una corriente, que a su vez genera fuerzas que se oponen al movimiento que imparten una aceleración al fluido radiando ondas electromagnéticas y haciendo que la perturbación original se propague con una frecuencia igual a :

$$f = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\epsilon\mu}} Hz^4 \quad (1.1)$$

Donde N representa la densidad de partículas y esta definida por la ecuación de Allen-Baumbach ( ver figura1.6):

$$N = (1,55r^{-6} + 2,99r^{-16})10^{14} \frac{electrones}{m^3} \quad (1.2)$$

<sup>3</sup>AGUILAR, Ernesto. Las ondas de Alfvén. Departamento. Física Espacial, UNAM, 1996. pág 3

<sup>4</sup>REITZ, John R, fundamentos de la teoría electromagnética , tercera edición, 1984, pág 334

<sup>5</sup>KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986, pág 8-46

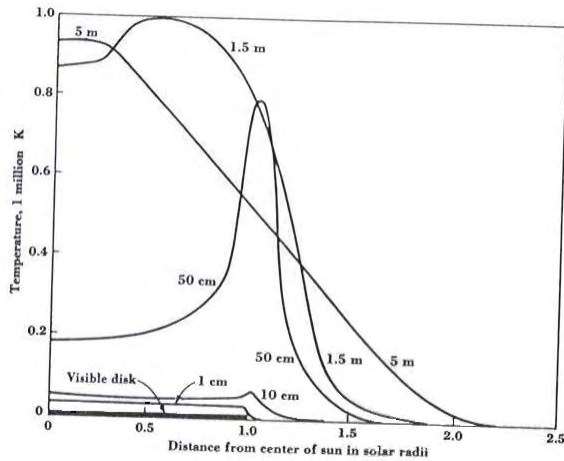


Figura 1.6: Se puede observar la variación de la temperatura de la cada capa solar, y como esta varia de acuerdo a la longitud de onda emitida, en la abscisa se encuentra la distancia en radios solares. Fuente, KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986, pág 8-46.

Por otra parte la ley de Planck afirma que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro como el sol, con una temperatura  $T$  en la frecuencia  $\nu$  viene dada por:

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1.3)$$

En el caso de las ondas de radio, el término  $h\nu \ll kT$ , se puede utilizar la aproximación

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = 1 + \frac{h\nu}{kT} \quad (1.4)$$

De esta forma la ecuación de Planck se simplifica a la ecuación de Rayleigh - jeans dado por

$$I_\nu = \frac{2h\nu^2}{c^2} kT \quad (1.5)$$

Donde existe una relación lineal entre la intensidad de radiación y la temperatura. El máximo de la curva de Planck, está relacionado por la Ley de desplazamiento de Wien definida por medio de la siguiente ecuación:

$$\lambda_{max} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{T} m.T \quad (1.6)$$

Ya sabemos como se comporta la radiación, Ahora estudiemos los fundamentos de como se puede medir la radiación que nos llega desde una fuente del universo, en este caso el sol, y la correlación que existe entre lo que medimos y la señal.

### 1.3 FUNDAMENTOS DE RADIO ASTRONOMÍA

Si queremos medir la potencia o la energía emitida por unidad de tiempo, de radiación electromagnética que nos llega de una fuente de radio desde el cielo, utilizando una antena de área  $A$ , (ver figura 1.7) donde  $dA$  es el diferencial de la área de la antena, el Angulo  $\theta$  es medido desde el cenit, nuestra antena cubrirá un  $d\theta$  en el cielo. si el ancho de banda que queremos receptor la señal es  $d\nu$ , la potencia de recepción de la señal esta dada por:

$$dw = B \cos\theta dA d\theta d\Omega \quad (1.7)$$

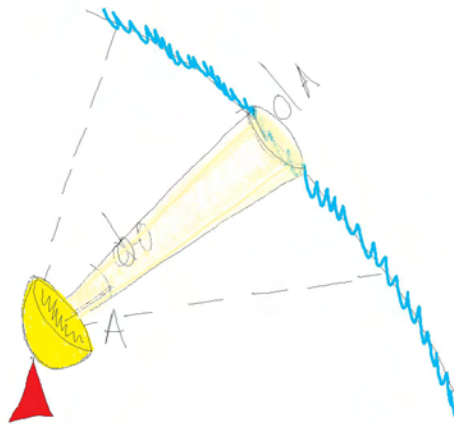


Figura 1.7: Relación entre los diferenciales y la potencia emitida desde un punto en el cielo. Fuente de esta investigación.

Donde  $d\Omega$  es diferencial del Angulo sólido y  $B$  es llamado Brillo emitido por la fuente. Es de importancia aclara que  $dw$  no depende la posición de  $dA$  sobre  $A$  en otras palabras a cada segmento de área de la antena, le llega la misma potencia cuando se apunta hacia la fuente, en cambio  $B$  es tanto función de la posición en el cielo como de la frecuencia. El brillo total de un ancho de banda estará dado por:

$$B^* = \int B d\nu \quad w^2 m^{-2} rad^{-2} \quad (1.8)$$

A este brillo se lo denomina brillo espectral, de esta forma la potencia total teórica receptionada es:

$$w = A \iint B^* \cos\theta d\Omega^6 \quad (1.9)$$

<sup>6</sup>KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986,pág 3-4

### 1.3.1 Patrón de radiación

Teniendo una fuente fija de radiación, y si se moviera nuestra antena un ángulo respecto a la radiación incidente, se podría medir la cantidad de dicha radiación, al graficar los datos obtenidos, se obtendría una distribución como la mostrada en la figura 1.8 en coordenadas cartesianas ,o la figura 1.9 en coordenadas polares <sup>7</sup>

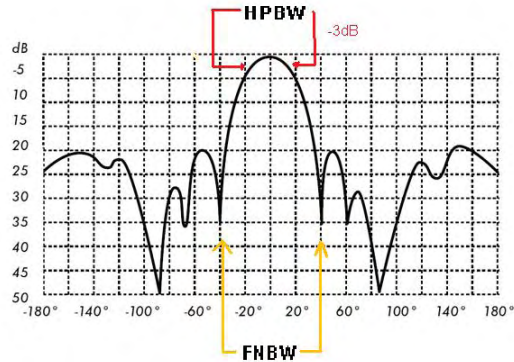


Figura 1.8: Variación de la intensidad en función del ángulo graficada en coordenadas cartesianas. Fuente *wikipedia.org*.

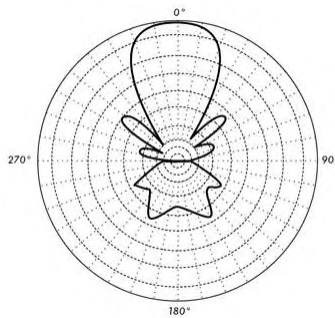


Figura 1.9: Variación de la intensidad en función del ángulo graficada en coordenadas polares. Fuente *wikipedia.org*.

A lo anteriormente expuesto se le llama patrón de radiación, los parámetros de la antena se deducen de su diagrama de radiación, estos parámetros son:

Ancho de haz a -3dB (**Half Power Beamwidth, HPBW**): separación angular entre

<sup>7</sup>Ledesma Avila Oscar, Patiño Vanegas Alberto, Peña Pedraza Heriberto. Sistema automático para la obtención de patrones de radiación de antenas de bocina. Revista Colombiana de física volumen 38. 2006, pág 2-5

las direcciones en las cuales el diagrama de radiación toma valores iguales a la mitad del máximo de potencia

Ancho de Haz entre nulos (**First Null Beamwidth, FNBW**): Separación angular entre las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma valor mínimo.

### 1.3.2 Distribución espacial del brillo $P(\theta\phi)$

Como el brillo es función del espacio y la frecuencia, la potencia receptionada por la antena puede ser escrita finalmente en función del patrón de radiación como:

$$w = \int B(\theta\phi)P(\theta\phi)d\Omega \quad (1.10)$$

### 1.3.3 Intensidad de radiación

Considérese ahora que la superficie de la antena antes receptora, ahora es emisora, ver gráfico 1.7, la potencia espectral que fluye de la superficie esta relacionada por :

$$dw = I \cos\theta dA d\Omega \quad (1.11)$$

Si la superficie emite uniformemente la potencia esta dada por:

$$w = A \iint I \cos\theta d\Omega \quad (1.12)$$

De esto se puede concluir que:

$$I = \frac{w}{A} \quad (1.13)$$

### 1.3.4 Densidad de flujo

Es la integral de la intensidad, sobre toda la extensión de la fuente de radio emisión, es decir sobre su Angulo sólido, matemáticamente esto se lo puede escribir como:

$$s = \iint I(\theta\phi)d\Omega \quad (Janskys = \text{wm}^2\text{Hz}^{-1}) \quad (1.14)$$

Como la detección de este flujo es realizada con una antena, la señal obtenida será cambiada de alguna manera con la respuesta de la antena a la señal, entonces el flujo obtenido se lo puede representa como:

$$s_{ob} = \iint I(\theta\phi)P_n(\theta\phi)d\Omega \quad (1.15)$$

---

<sup>8</sup>KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986, pág 3-18.

En este orden de ideas se puede decir que el instrumento no provee la verdadera imagen del objeto observado, sino que proporciona la convolución<sup>9</sup> de la respuesta del instrumento ( $P_n(\theta\phi)$ . ) con la verdadera brillantes del objeto.

### 1.3.5 Función de transferencia

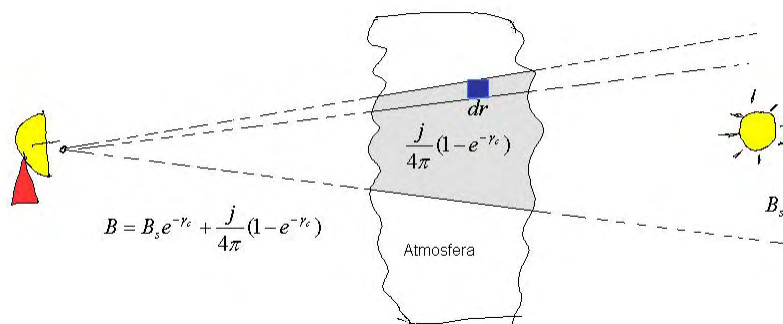


Figura 1.10: Señal detectada por la antena en la tierra. Fuente de esta investigación.

Lo que se pretende es detectar radio emisiones desde la superficie terrestre (ver figura 1.10). En su camino hasta el sensor estas emisiones atraviesan la atmósfera, que produce variaciones de intensidad de la señal, si a la atmósfera la consideramos como un medio absorbente y emisor a la vez de energía, la ecuación diferencial que me representa el brillo detectado por el sensor esta dado por:

$$dB = -BK\rho dr + \frac{j}{4\pi}\rho dr \quad (1.16)$$

El primer término de la derecha me representa la emisión de brillo de la atmósfera, y el segundo la disminución hecho por el medio que atenúa. Si reescribimos la ecuación se tiene que:

$$\frac{dB}{dr} + Bk\rho = \frac{j}{4\pi} \quad (1.17)$$

Tiene la forma de la ecuación de Leibniz donde la solución es:

$$B = B_s e^{\gamma_c} + \frac{j}{4\pi} (1 - e^{\gamma_c}) \quad (1.18)$$

Donde  $B$  es Brillo aparente observado,  $B_s$  Brillo de la fuente, y  $\gamma_c$  Espesor óptico.

<sup>9</sup>La convolución es el nexa entre el dominio del tiempo y la frecuencia y esta definida por:  $y(t) = \int x(\tau)h(t - \tau)d\tau$  si se conoce la respuesta impulsional de  $h(t)$  , la integral de convolución permite determinar la respuesta  $y(t)$  en un sistema lineal para cualquier excitación  $x(\tau)$



## 1.4 TEMPERATURA DE LA ANTENA

Se debe reescribir ahora La temperatura de brillo presente en la antena debido a la influencia de la fuente, como se expreso anteriormente queda determinada por la región emisora a detectar con su patrón angular. La potencia espectral de la antena es:

$$w = \frac{1}{2}A_E \iiint B(\theta\phi)P(\theta\phi)d\Omega d\nu = kT_A \quad (1.19)$$

utilizando la ecuación (1.5) y si el haz de la antena es mucho más grande que el haz del objeto observado; el objeto observado se lo puede considerar como puntal, de esta forma el patrón de radiación  $P(\theta\phi) = 1$  de esta forma tenemos:

$$T_A = \frac{1}{2} \frac{A_E}{\lambda^2} \iint T_f(\theta\phi)d\Omega \quad (1.20)$$

Como el haz de la antena esta relacionado con la longitud de onda observada por

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A_E} (\text{estereorradianes}) \quad (1.21)$$

La ecuación (1.20) la podemos reescribir como:

$$T_A = \frac{\Omega_f}{\Omega_A} T(\text{promedio})^{10} \quad (1.22)$$

La señal que mide el receptor es una combinación lineal de señales emitidas y ruido, por la expresado en la ecuación (1.3) y (1.13),esta señal detectada, ecuación (1.18) la podemos escribir en términos de la temperatura, donde le debemos agregar la temperatura del sistema receptor, de esta forma la ecuación (1.18) la podemos expresar de la siguiente manera.

$$T_m = T_{rec} + T_{atm} + T_s \xi^{11} \quad (1.23)$$

donde  $T_{rec} = T_A + T_{radio}$  ;  $T_{atm} = T_c(1 - e^{-\gamma_c})$ ;  $\xi = e^{-\gamma_c}$

---

<sup>10</sup>KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición,1986,pág 3-42

<sup>11</sup>KIYOTO, Shibasaki. Microwave Observations of the Quiet Sun. Nobeyama Radio Observatory,1998,pág 2

# Capítulo 2

## DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En este capítulo describiremos las partes que conforman el radio telescopio experimental utilizado y hablaremos en forma general de los aspectos más importantes que hay que tener en cuenta en su construcción.

En la investigación se llevo el monitoreo de la cromosfera solar, la radiación emitida por esta capa se encuentra entre 2 -20Ghz ,y para la observación de esta capa solar se utilizo un sensor de bajo ruido ( LNB ) de un ancho de banda de 11.4 a 12.4 GHz.

### 2.1 RADIO TELESCOPIO.

El radio-telescopio es un dispositivo que tiene como objetivo detectar las emisiones de radio provenientes de fenómenos astronómicos, la señal a detectar se origina por fenómenos no térmicos, al vibrar el plasma, emitiendo una radiación Sincrotrónica.

Las partes que conforman el montaje experimental son: una antena en este caso del tipo parabólico de tipo offset, un sensor LNB, un amplificador integrador, un conversor ADC y un programa realizado en el lenguaje de programación LABview. en la figura 2.1 se puede observar las partes que conforman el dispositivo experimental, y la dirección el recorrido de la señal atreves de cada una de sus partes.

### 2.2 ANTENA

En el elemento constitutivo más importante, es el encargado de recibir la señal proveniente del fenómeno astrofísico; de su tamaño dependerá el ancho de banda así como la resolución de la señal.

Par detectar señales en la banda de los Ghz se puede utilizar antenas del tipo parabólico, el diámetro mínimo de esta antena dependerá de la frecuencia a detectar, y esta

## DIAGRAMA DE BLOQUE DE UN RADIO TELESCOPIO

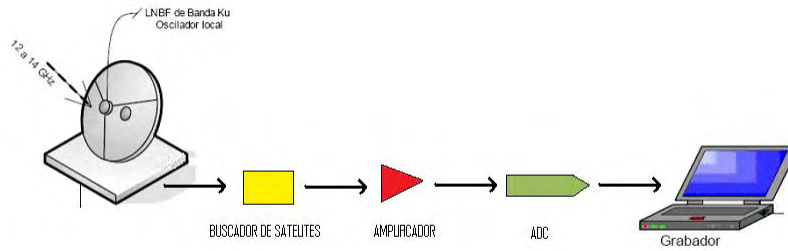


Figura 2.1: Recorrido de la señal en un radio telescopio, Fuente de esta investigación.

relacionado por la siguiente ecuación:

$$d_{min} \geq 10\lambda \quad (2.1)$$

Donde  $d_{min}$  Diámetro mínimo de la antena y  $\lambda$  es la longitud de onda en metros de la señal detectada.

En este proyecto se utilizó una antena de tipo offset de marca RCA, en este tipo de antena, la superficie se obtiene recortando de grandes superficies parabólicas de una matriz esférica, quedando el foco desplazado hacia abajo, de forma tal que queda situado fuera de la superficie de la antena, al no tener efecto de sombra la superficie parabólica, tiene un rendimiento del 10 por-ciento superior a las de foco centrado. ver figura 2.2 <sup>1</sup>.



Figura 2.2: Antena de tipo offset, RCA. Fuente wikipedia.org.

<sup>1</sup>PERE SOLER I,alba, el espectro Radioeléctrico y el estudio del sol,2006, pág. 22

### 2.2.1 Patrón de antena

Para representar la respuesta de la antena a la radiación, se utiliza el diagrama polar, el máximo de esta cantidad de radiación se obtiene al orientar la antena hacia la fuente de radiación, este máximo es denominado lóbulo principal. El Angulo entre los dos puntos del lóbulo en que la intensidad recibida es la mitad del máximo se llama anchura a media altura HPBW y se suele definir como el tamaño del haz que determina el poder de resolución de la antena

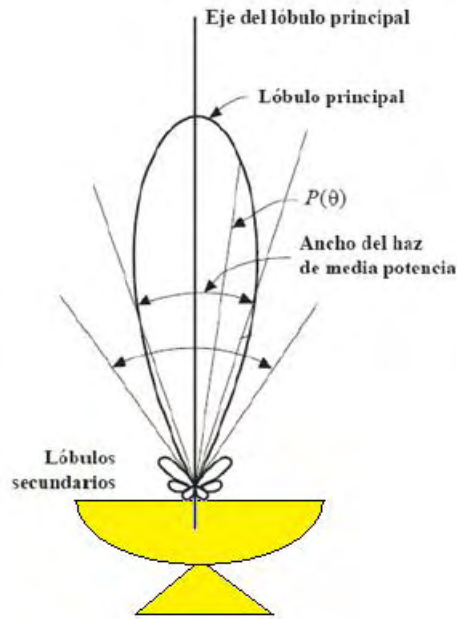


Figura 2.3: Se observa el lóbulo principal, HPBW, lóbulos secundarios de una antena parabólica. Fuente de esta investigación.

### 2.2.2 Resolución de la antena

Esta definido por el Angulo de apertura de la antena, ósea el Angulo que forma el lóbulo principal, esta dado por

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (2.2)$$

Donde  $\theta$  la Resolución medido en radianes,  $\lambda$  longitud de onda en metros ,  $d$  diámetro de la antena en metros.

### 2.2.3 Angulo sólido de la antena

El ángulo sólido de la antena esta definido por su apertura efectiva y dado por:

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A_e} \quad (2.3)$$

$\lambda$  Longitud de onda,  $A_e$  área efectiva de la antena ,  $\Omega_A$  ángulo sólido.

### Directividad y ganancia de la antena y ganancia

La directividad es una magnitud que da una idea de lo buena que es una antena recojiendo la radiación de un único punto. La antena es más directiva cuando más estrecho es su lóbulo principal y más pequeño son sus lóbulos secundarios. Se define como:

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (2.4)$$

### 2.2.4 Eficiencia del haz

Es la relación entre el patrón de antena o la respuesta de radiación y el lóbulo principal. Se define como:

$$\varepsilon_{ap} = \frac{\Omega_m}{\Omega_A} \quad (2.5)$$

## 2.3 SENSOR LNB

Es un dispositivo electrónico que recibe la señal en GHz, la amplifica y la transforma en una frecuencia en el rango de Mhz, llamada frecuencia intermedia (FI) por medio de la mezcla con un oscilador local. Características principales de este sensor son la figura de ruido (NF), y su ancho de banda de operación.



Figura 2.4: Sensor LNB. Fuente wikipedia.org.

### 2.3.1 Figura de ruido (NF)

Nos indica la cantidad de señal que no pertenece a la señal original, para este sensor, se especifica en decibeles y se encuentra relacionada con la temperatura a través de la siguiente relación:

$$T_R = 290 * 10^{\left(\frac{NF}{10} - 1\right)} \quad (2.6)$$

Donde  $NF$  Figura de ruido, y  $T_R$  temperatura del receptor. El receptor utilizado es este proyecto es de marca ITB-K851DI en la banda KU en el rango de 11.7- 12,7 Ghz y su figura de ruido es de 0,4 db según especificaciones del fabricante.

## 2.4 RADIÓMETRO

### 2.4.1 Buscador de satélites

Es un dispositivo electrónico de uso comercial, utilizado como instrumento de apuntamiento de las antenas parabólicas. El instrumento posee un vúmetro el cual indica en una escala en dB. En una primera etapa de amplificación, la señal detectada por el LNB tiene una correlación directa con un voltaje dentro del buscador de satélites, que puede ser caracterizado. El aspecto de este instrumento se puede observar en la figura 2.5.



Figura 2.5: Buscador de satélites. Fuente wikipedia.org.

### 2.4.2 Tarjeta Amplificadora

Esta etapa es la encargada de recibir la señal de voltaje proveniente del buscador de satélites, la amplifica y la estabiliza hasta un voltaje adecuado para ser digitalizada. Su parte principal son dos amplificadores operacionales de referencia LF356 donde su ganancia es del orden de 100db dispuestos como en el diagrama de la figura 2.6.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>PERE SOLER,Alba,el espectro Radioeléctrico y el estudio del sol,2006, pág. 28

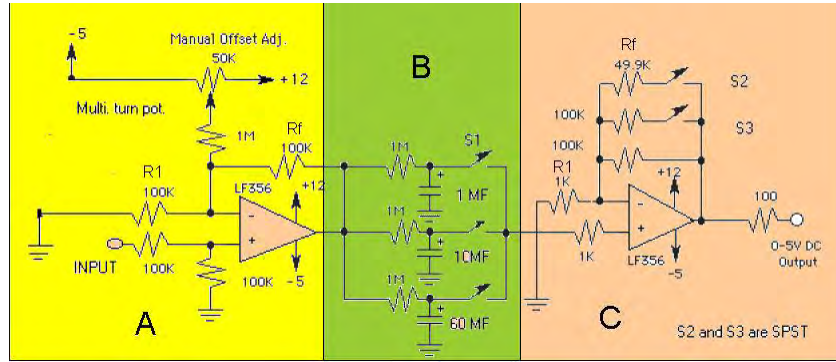


Figura 2.6: Diagrama de la tarjeta amplificadora, su diseño realizado por la universidad de Indianápolis. En este se muestran las partes constitutivas del circuito completo. A y C amplificadores. B integrador. Fuente de esta investigación.

### etapa A de amplificación

Esta primera etapa de amplificación tiene como característica principal un circuito llamado offset, este se encarga de ajustar el nivel de voltaje muy próximo a cero, en la ausencia de señal, en la figura 3.6 esta conformado por el potenciómetro de 5K y la resistencia de 1M . El circuito total se lo llama amplificador no inversor y su señal de salida esta definida por la siguiente ecuación:

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_i + v_{of} \quad (2.7)$$

donde  $v_{of}$  es el voltaje de offset de esta manera el voltaje de salida deberá ser la suma del voltaje de entrada más o menos de acuerdo la polaridad del voltaje offset. La ganancia del circuito sera determinada aproximadamente por el valor de:

$$G = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \quad (2.8)$$

### Etapa B de integración

Retiene la señal de potencia del amplificador A por un determinado tiempo. El valor de tiempo de integración comúnmente usado es del orden de los segundos, y su selección dependerá el registro de una buena señal, ya que si se selecciona muy corto período de tiempo, hará que el ruido en la salida sea excesivo, y un muy largo período de tiempo, provocará suavizado prolongado y pérdida de información. El tiempo de integración de esta etapa está dado por:

$$t = \frac{1}{RC} \quad (2.9)$$

Donde  $R$  Resistencia en ohmios,  $C$  capacitancia en faradios.

## Etapa C de amplificación

Esta etapa controla la ganancia final del sistema, a través de los swiche s3 s2, pudiendo regular el voltaje de salida entre voltajes desde 0 a un máximo de 5V, voltaje adecuado de trabajo de la etapa de conversión análogo digital, su diseño se encuentra realizado en base del modelo llamado amplificador no inversor, donde su ecuación de salida esta definida por:

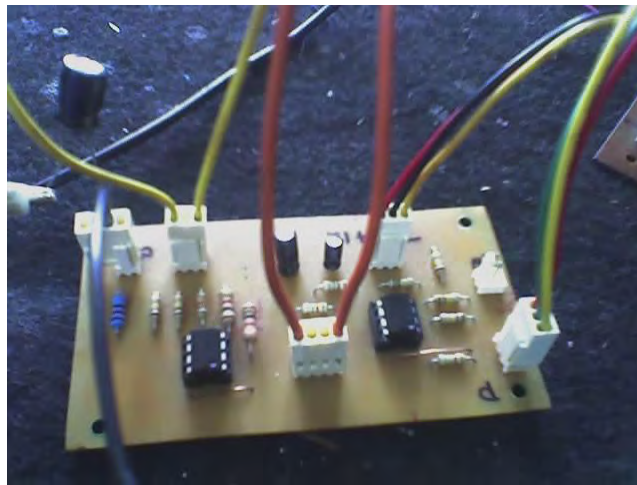
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_i \quad (2.10)$$

Para consultar los planos eléctricos de la etapa amplificadora y el diagramas de circuitos impresos ver anexos A

### 2.4.3 Tarjeta conversor análogo digital

En esta etapa se digitaliza la señal proveniente del circuito amplificador. Su principal componente es un conversor análogo digital de referencia ADC0808, y circuitos integrados LM555 y 74LS04 como circuitos de apoyo.

El circuito ADC0808 tiene un convertidor analógico-digital de 8 bits, un multiplexor de 8 canales y una lógica de control que lo hace compatible con todos los microprocesadores. Para la conversión utiliza el método de aproximaciones sucesivas, ofrece gran velocidad, gran exactitud, mínima dependencia a la temperatura, excelente repetitividad y un consumo mínimo de energía.



*Figura 2.7: Etapa de amplificación del radiómetro. Fuente de esta investigación.*





*Figura 2.8: Etapa de digitalización del radiómetro diseñada con el adc0808. Fuente de esta investigación .*



*Figura 2.9: Sistema completo del radiómetro. Fuente de esta investigación*

Para consultar los planos eléctricos de la etapa de digitalización y el diagrama de circuito impreso ver anexo B, la fuente de alimentación del instrumento anexo C

## **2.5 PROGRAMA REGISTRADOR**

Se encuentra diseñado en el lenguaje de programación gráfico de alto nivel llamado LABview. El panel frontal de la aplicación se puede observar en la fig.3.10, este controla el radiómetro. Cuenta con una pantalla gráfica que registra la variación del voltaje en función del tiempo, visualizadores digitales de voltaje, hora fecha, y temperatura de

brillo, también cuenta con selectores de rata de muestro, canales de conversión, voltaje de referencia y de inicio y parada de registro.

Al finalizar el muestro, el programa crea un archivo en donde se encuentra el registro de valores de voltaje, temperatura de brillo y hora y fecha, estos datos pueden ser visualizados en la mismo programa o en programas compatibles como Excel.

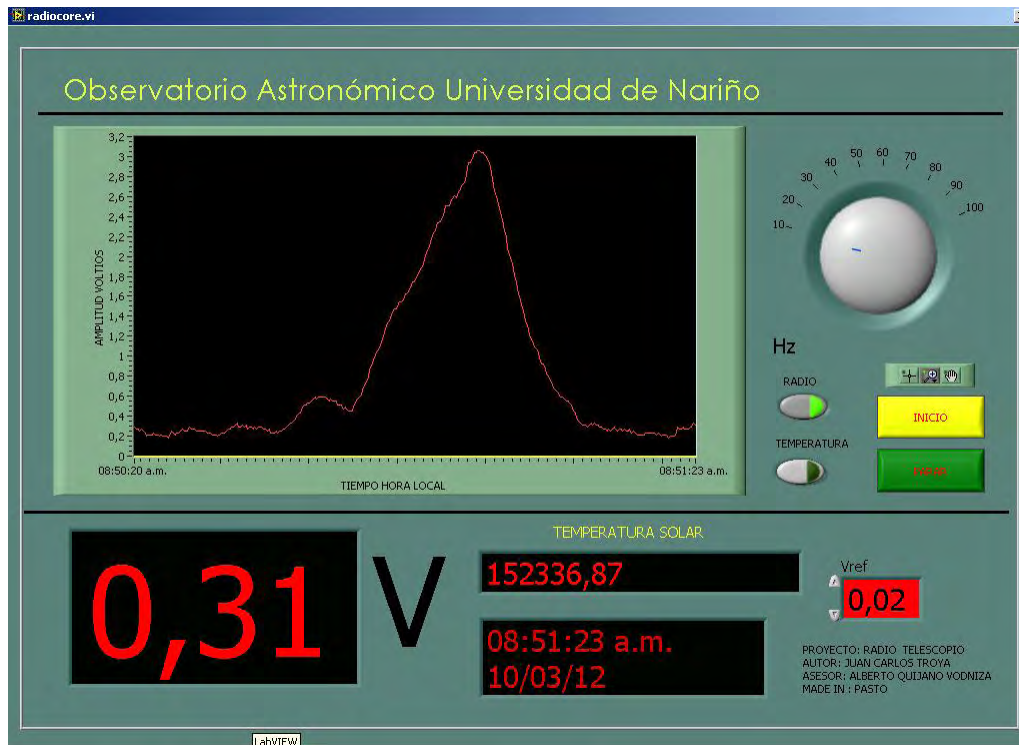


Figura 2.10: Panel frontal del instrumento virtual, programa realizado en el lenguaje LABview. Fuente de esta investigación.

Para consultar el código del programa ver anexos D

## 2.6 TEMPERATURA DEL SISTEMA

La temperatura efectiva de ruido total de un sistema receptor puede considerarse, arbitrariamente, formada por tres componentes: (a) La temperatura de ruido externo captada por la antena,  $T_A$ <sup>3</sup>. (b) La temperatura de ruido de los componentes que conectan la antena al receptor, tales como línea de transmisión, conectores, acopladores, transiciones, etc.,  $T_{LP}$  y (c) la temperatura de ruido generada en el propio sistema,  $T_R$  carac-

<sup>3</sup>La temperatura del a antena es determinada por el fabricante, para un antena de marca RCA =  $45^\circ K$

terizada generalmente por su figura de ruido del sensor todo referido hasta la entrada del radio.

$$T_{sis} = T_A + T_{LP}[L - 1] + T_R L^4 \quad (2.11)$$

## 2.7 DENSIDAD DE FLUJO DETECTABLE

Este parámetro nos establece que fuentes de radiaciones podemos observar con nuestro radio telescopio y está dado por:

$$\Delta S = \frac{2kK_s T_{sis}}{A_e \sqrt{\Delta\nu t}} = \frac{2kK_s T_{sis}}{\varepsilon_{ap} A \sqrt{\Delta\nu t}} \quad (2.12)$$

Donde  $k$  Constante de Boltzmann,  $K_s$  constante del receptor y depende de la clase de receptor a utilizar, el instrumento utilizado en este proyecto se encuentra en la clase de flujo total donde el valor de la constante tiene un valor de 1.  $T_{sis}$  es temperatura del sistema en<sup>0</sup>K,  $\varepsilon_{ap}$  la eficiencia de apertura,  $A_e$  apertura efectiva,  $A$  apertura m,  $\Delta\nu$  ancho de banda Hz del LNB,  $t$  tiempo de integración (seg.)

---

<sup>4</sup>KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986,pág 7-27

# Capítulo 3

## PROCEDIMIENTO

En este capítulo se dedicará a describir el procedimiento experimental de que se debe llevar a cabo para caracterizar las señales obtenidas y poder de un manera aproximada tomar la información sobre el fenómeno de radio emisión.

### 3.1 TEMPERATURA DE LA MUESTRA

El radiómetro que se utilizó es de flujo total, o sea la señal que tomamos como muestra, no es comparada con ninguna otro tipo de señal, la señal de control que se monitorea es de voltaje, y la variable a estudiar es la temperatura de brillo. De esta forma lo primero a describir es una correlación entre estas variables, y eliminar de la señal de muestra en lo posible las fuentes de ruido.

Hay que empezar por recordar que la intensidad de radiación en la proximidad de las microondas, se encuentra dada por:

$$I_\nu = \frac{2\hbar\nu}{c^2}kT \quad (3.1)$$

Que es una relación lineal entre las magnitudes, de esta forma podemos asignar una escala de temperatura a la intensidad recibida por el radiómetro (ver Fig. 3.1).

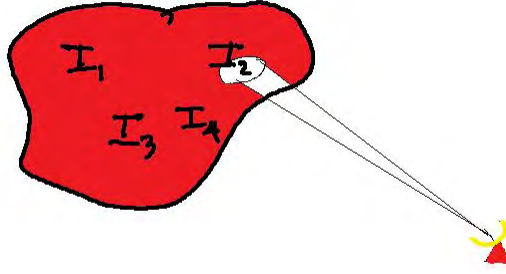


Figura 3.1: Si se tuviera la suficiente resolución angular, o sea que el ángulo sólido de la antena es menor que de la fuente podríamos hacer un mapeo de intensidades del cuerpo emisor. Fuente de esta investigación.

Como el objeto de estudio en este caso el sol, el haz de la antena es mayor que el haz de radiación (ver Fig. 3.2) , el objeto emisor es considerado como puntal, de esta forma no se está detectando la intensidad, sino la densidad de flujo de esta radiación. Matemáticamente este flujo se encuentra relacionado por la siguiente ecuación.

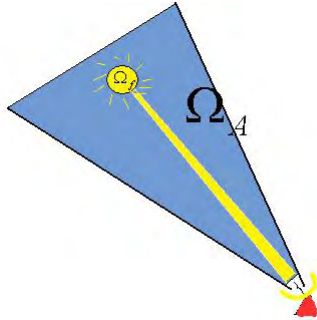


Figura 3.2: El ángulo sólido de la antena es mayor que el ángulo sólido de la fuente, en este caso el objeto puede ser considerado como puntal. Fuente de esta investigación.

$$S = \iint I \cos\theta d\Omega \quad (3.2)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo en la dirección al centro de la fuente. Y  $S$  es la densidad de flujo. Esta densidad de flujo también se encuentra relacionada con la temperatura de la antena por medio de:

$$S_{ob} = \frac{2kT_1}{A_e} \quad (3.3)$$

---

<sup>1</sup>KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, 1986, pág.3-41

Donde si los ruidos del sistema fueran nulos la temperatura de la muestra estaría definida por:

$$T_m = \varepsilon T_A \quad (3.4)$$

Es la temperatura de la antena debida a la temperatura de la fuente. En realidad esta temperatura de muestra esta dada por una combinación lineal de ruidos y señal, matemáticamente lo podemos expresar de la siguiente manera:

$$T_m = T_{rec} + T_{atm} + T_f \varepsilon \quad (3.5)$$

Por otra parte el sensor utilizado (LNB) es un dispositivo lineal, esto nos garantiza que un aumento en el flujo de radiación, corresponderá aun aumento en el voltaje a las salidas del sensor, de esta forma la anterior ecuación la podemos expresar en términos de voltaje.

$$V_m = V_{rec} + V_{atm} + V_f \varepsilon \quad (3.6)$$

Al poder expresar los voltajes y temperaturas de esta manera, caracterizar el receptor correspondería a ajustar la curva de la siguiente función

$$T_m(v) = \varepsilon V_f + V_{sis} \quad (3.7)$$

Donde  $V_{sis}$  es la suma de los voltaje debidos a la atmósfera y el receptor, entonces debemos eliminar este ruido(  $V_{sis}$ ) y encontrar el valor del parámetro  $\varepsilon$  para determinar el voltaje generado por la fuente.

### 3.1.1 Ajuste de la curva de calibración

Para determinar la ecuación de una recta se necesita dos puntos conocidos, en este caso dos temperaturas diferentes que me generen en el receptor dos voltajes correspondientes a dichas temperaturas ver figura 3.3.

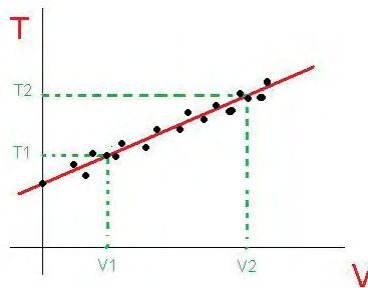


Figura 3.3: En la gráfica  $T1$  y  $T2$  corresponden a la temperatura  $T_{rec} + T_{atm} + T_f \varepsilon$ . Fuente de esta investigación.

Una de estas temperaturas puede ser la temperatura del sistema dada por la siguiente ecuación

$$T_{sis} = T_A + T_{LP}[L - 1] + T_R L \quad (3.8)$$

La cual nos genera un voltaje  $V_1$ , y la otra temperatura es la radiación de la tierra igual a  $298 \pm 5K$  la cual nos genera un voltaje  $V_2$  correspondiente al apuntar la antena aun lugar del cielo sin influencia del sol.

Si ajustamos el offset del radiómetro para un voltaje  $V_1$  de cero,  $T_1$  cortara la ordenada de la gráfica, y será una constante dentro de nuestras medidas que podemos eliminar al restar de las muestra que tengamos del experimento, de esta forma podemos ajustar la curva en el origen y la pendiente será determina por  $V_2$ ,  $T_2$  de tal forma que:

$$T_m(V) = \frac{T_2}{V_2} V_f \quad (3.9)$$

Cabe recordar que la antena se encuentra en equilibrio termodinámico con la fuente emisora, en este caso el sol, de esta forma podemos también relacionar la temperatura promedio de la fuente con la temperatura de la antena debido a la influencia de la fuente con la siguiente expresión:

$$T_m = T_A = \frac{\Omega_f}{\Omega_A} T(\text{promedio}) \quad (3.10)$$

Que es otra forma de expresar los datos que obtendremos con el radiómetro. Al igualar estas expresiones podemos concluir que:

$$T(\text{promedio}) = \frac{\Omega_A}{\Omega_f} \frac{T_2}{V_2} V_f \quad (3.11)$$

La expresión anterior nos permite calcular de una forma aproximada la temperatura de la fuente a partir de la señal de voltaje entregada por el radiómetro, suprimiendo de esta la temperatura del sistema.

### 3.1.2 Angulo solido de la antena

En la ecuación anterior se puede ver la correlación numérica entre los ángulos sólidos de la antena y de la fuente, de esto es imprescindible conocer con la mayor precisión el ángulo sólido de la antena con la cual se va a experimentar, el diámetro angular del sol es de 0,5 grados, en los siguientes párrafos se describe una forma como llevar a cabo la aproximación del ángulo sólido de la antena utilizando satélites geoestacionarios.

Primero describamos la técnica como realizar las observaciones. Esta toma de datos se conoce como observación en continuo donde el principal objetivo es conocer cuanta

---

<sup>2</sup>LONC, William P. Radio Astronomy Projects. Radio-Sky. 1996, pág 45

radiación llega de un determinado punto del cielo dentro de nuestra banda de observación. Un factor importante dentro de la observación en continuo es el apuntamiento de la antena a la fuente de observación, para esto se debe seguir un estrategia de apuntamiento descrita en el párrafo siguiente.

1. Se envía la antena al calibrador elegido
2. Se hace un barrido por encima de la fuente en elevación y cross-elevación (la dirección perpendicular a la elevación), si el telescopio es de montura altozimal, o bien en declinación y en cross-declinación, si es de montura ecuatorial.
3. Se corrige la posición de la antena según los resultados obtenidos

Según el patrón de la antena, la potencia recibida de una fuente varía con la dirección de apuntamiento, siendo máxima cuando la antena apunta justo en la dirección de la fuente. La representación de la potencia recibida al realizar el barrido tendrá justamente la forma del haz de la antena, cuyo lóbulo principal es aproximadamente gaussiano.

Si al realizar un barrido, obtenemos una forma gaussiana cuyo máximo se encuentra en el centro, sabremos que la antena está bien apuntada. Si no ocurre eso, habría que corregir la posición de la antena hasta que la fuente se encuentre en el centro. En las figuras 4.4 y 4.5 se explican esto gráficamente



*Figura 3.4: La cruz negra marca el lugar donde está apuntada la antena, que no coincide con el centro de la fuente. Así, el máximo de la gaussiana no coincidirá con el centro de uno de los barridos, por lo que debemos corregir la posición de la antena. Fuente wikipedia.org.*



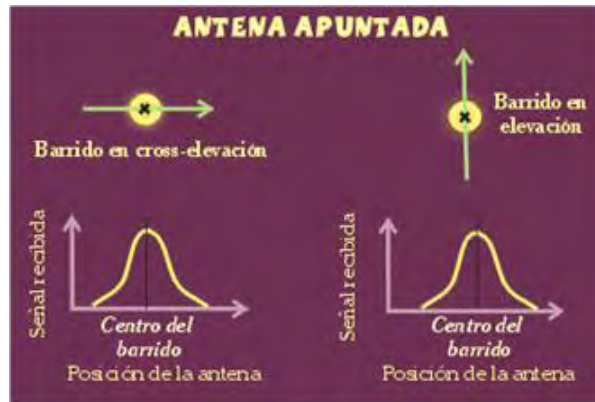


Figura 3.5: En este caso sí tenemos la antena apuntada en el centro de la fuente, por lo que vemos que en cada barrido se obtiene una curva de forma gaussiana con su máximo en la posición central del barrido. Ambas curvas son de igual intensidad. Fuente wikipedia.org.

Es necesario, por tanto, realizar siempre las correcciones de apuntado antes de observar la fuente problema. Se debe utilizar un calibrador lo suficientemente intenso para ser detectado y que se encuentre lo más cerca posible de la fuente. Lo normal es realizar varios barridos en el calibrador hasta que las correcciones que se encuentren sean mínimas y estables.

Utilizando la técnica descrita de apuntamiento se pretende obtener el ángulo sólido de la antena en forma experimental, y luego se podrá comparar los resultados con el modelo de la teoría de antena, en el que el ángulo sólido está definido por:

$$\theta \simeq 1,22 \frac{\lambda}{d} \text{ Rad}^2 \quad (3.12)$$

## 3.2 CURVA EXPERIMENTAL DE LA ANTENA UTILIZADA

Los satélites geoestacionarios cumplen con el requerimiento de radiación de campo lejano o sea que se encuentran en la zona de fraunhofer<sup>3</sup>, la portadora utilizada en la transmisión de datos es estable, de esta forma el frente de onda es plano y el patrón de antena se puede definir. Siguiendo la técnica de apuntamiento escrita anteriormente, al variar el ángulo frente a la radiación incidente se puede observar una variación de voltaje correspondiente con la densidad de radiación. En la gráfica 3.6 se puede observar

<sup>3</sup>Hace referencia la patrón de campo que está a gran distancia de la antena donde  $r = \frac{2d^2}{\lambda}$ ,  $r$  distancia desde el lugar de radiación,  $d$  diámetro de la antena,  $\lambda$  longitud de onda.

los datos concernientes al experimento.

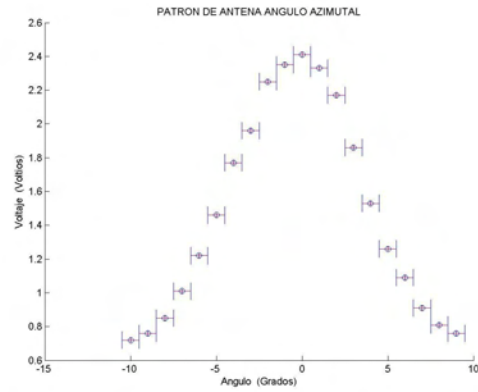


Figura 3.6: Gráfica de la curva experimental del patrón de antena RCA, la fuente de radiación satélite geostacionario. El eje vertical presenta una un error de 0,01 voltios y el eje horizontal un error de 0,5 grados. Fuente de esta investigación.

Lo que se desea es ubicar los valores de voltaje y ángulo correspondiente a -3db de la máxima radiación, para lograr esto se realiza una interpolación ajustando una curva que pasaran por los datos reales obtenidos en el experimento, para lograr este objetivo se diseña un programa en Matlab, código de programación se encuentra en la sección de anexos E. La gráfica obtenida es la 3.7.

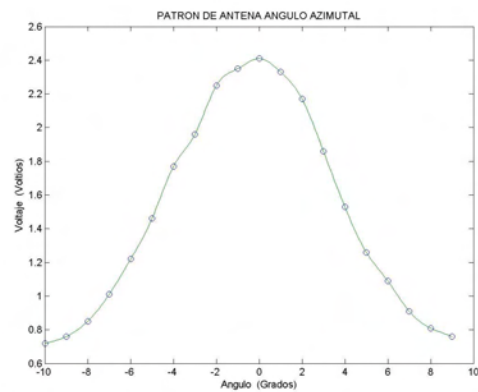


Figura 3.7: en la gráfica se puede observar la curva debida a la interpolación de datos entre los datos reales, el programa utilizado Matlab. Fuente de esta investigación.

El mismo experimento se realiza para el angulo de altitud.

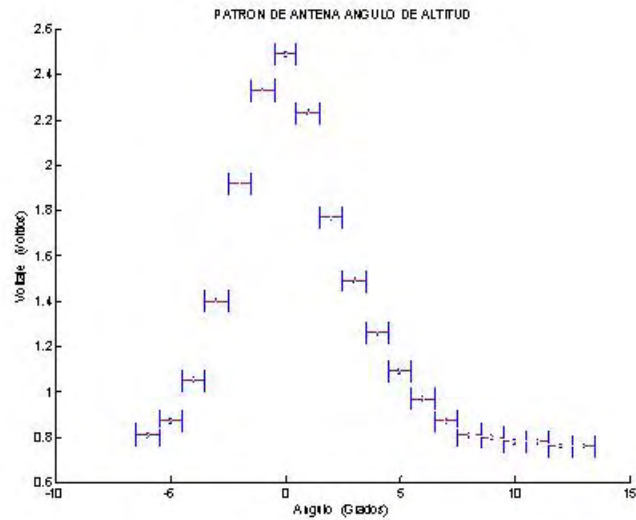


Figura 3.8: Gráfica de la curva experimental del patrón de antena RCA, la fuente de radiación satélite geostacionario. El eje vertical presenta una un error de 0,01 voltios y el eje horizontal un error de 0,5 grados.Fuente de esta investigación

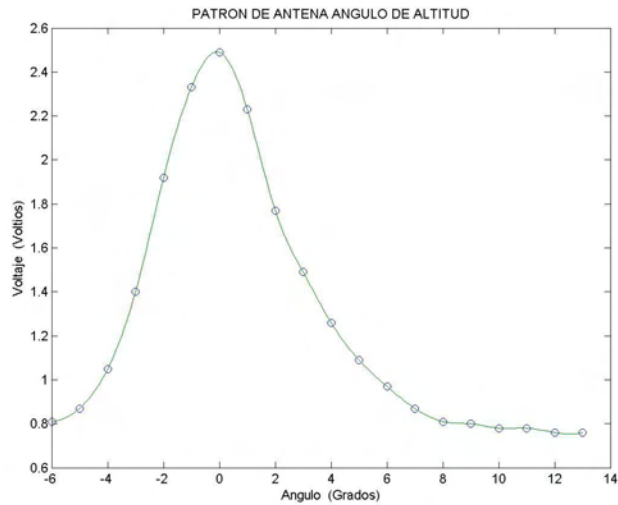


Figura 3.9: En la gráfica se puede observar la curva debida a la interpolación de datos entre los datos reales, el programa utilizado Matlab.Fuente de esta investigación.

De esta forma se realizan varios experimentos y un posterior procesamiento de los datos, entrega como resultado que tanto el Angulo azimutal y de altitud tienen valor de:

Angulo azimutal ( $\phi$ ):  $2,3 \pm 0,5$  grados o  $0,04 \pm 8,72$  Rad.

Angulo altitud ( $\theta$ ):  $3,0 \pm 0,5$  grados o  $0,05 \pm 8,72$  Rad.

Par mayor información sobre cálculos estadístico mirar la sección de anexos F y de los datos de los experimentos realizados en el anexo G.

Ahora comparemos los valores encontrados con el valor teórico de la ecuación 3.12. donde la longitud de onda de la observación es 0.025mts el diámetro de la parábola en el eje vertical es de 0,6 metros y 0,61 metros en forma horizontal de esta forma tenemos que:

Angulo azimutal ( $\phi$ ): 0,05083 Rad. = 2,91 grados

Angulo altitud ( $\theta$ ): 0,050 Rad. = 2,86 grados

angulo en grados	experimental	teorico	error
Azimutal	2.3+-0.5	2.86	24%
Altitud	3.0+-0.5	2.91	3%

Con los datos se puede ya calcular el valor del ángulo sólido de la antena donde su valor es igual a:

$$\Omega_A = 0.04 \times 0.05 = 0,0020 \pm 0,0003 \text{ Rad}^2$$

### 3.2.1 Area efectiva de la antena

ver ecuación (2.3)

$$A_e = \frac{0,0250^2}{0,0020} = 0,3122m^2$$

### 3.2.2 Temperatura del sistema

$$T_A = 45^0K$$

$T_{LP}$  = Temperatura promedio en la ciudad de Pasto (Nariño)

$T_R$  = Determinado de la figura de ruido  $NF = 0,4dB$  del sensor.

El decaimiento de la señal por unidad de longitud del cable lo determina el fabricante. Para el cable coaxial RG8 utilizado presenta un decaimiento de  $0,15dB/m$  el factor puede ser encontrado partir de la siguiente ecuación:

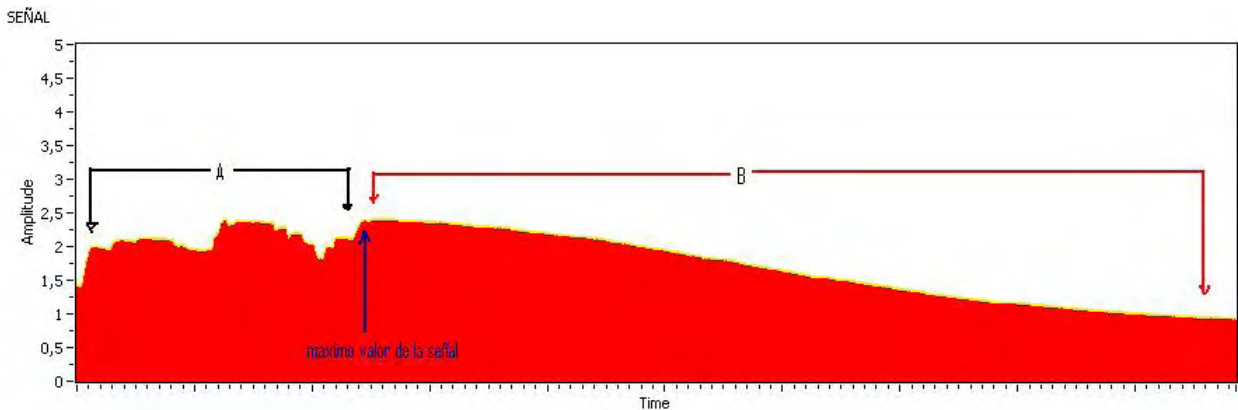
$$L = 10 \frac{dB}{10}$$

$L = 2,8$  Para una longitud de 30 m

$$T_{sis} = 644^0 K$$

### 3.3 TEMPERATURA PROMEDIO DEL SOL

La señales de muestra en el experimento tienen la forma mostrada de la gráfica 3.10 en esta, el interés científico consistía en medir su máxima amplitud, ya que de este valor, se deriva a través de la ecuación (3.11), la correspondiente temperatura de brillo.



*Figura 3.10: Se observa la región A de apuntamiento en busca de la máximo valor de la señal de la muestra, región B señal muestreada. El decaimiento pertenece al transito solar por el ángulo solidó de la antena. Fuente de esta investigación*

Luego de una serie de toma de señales, y un procesamiento de resultados se entrega un valor de la temperatura promedio solar de:

$$T(\text{promedio}) = 17262^0 K - 644^0 K = 16618 \pm 3181^0 K$$

Correspondiente a una longitud de onda de 2,5 cm, donde la fuente de emisión es la cromosfera solar. Los datos obtenidos en el periodo de investigación se encuentran en anexo H; si comparamos este resultado con los datos aforados en el artículo publicado por la NASA, Ver anexo I, el valor para la temperatura de brillo para un rango entre 2 y 3,16 centímetros de longitud de onda se encuentran entre 11.800 y 15.000 K . La falta de exactitud del valor encontrado el intervalo mencionado, es producido por un error sistemático al apuntar la antena, aunque el valor se encuentra dentro de la resolución

del instrumento utilizado.

Para mayor información de la forma de calibración del radiómetro y su utilización en el experimento ver anexo J para una caracterización del ruido presente en el receptor ver anexo K.

## CONCLUSIONES

- El valor de la temperatura de brillo promedio medio, en el rango de radiación de 11.7 a 12.7 GHz es de  $16618 \pm 3181$  grados kelvin; correspondiente a la radiación emitida por la cromosfera solar.

-El error en el valor de la temperatura brillo medida, depende en gran parte de la falta de resolución angular al apuntar la antena hacia el objeto de estudio, de esta forma un sistema de guía más exacto dará como resultado un menor error de la medida.

## RECOMENDACIONES

- Una de las fuentes de ruido al detectar la señal de temperatura son las nubes, de esta forma un estudio de la atmósfera nubosa nos daría una caracterización del decaimiento de la señal.
- La falta de precisión en las muestras se debe a la resolución angular al guiar la antena, se recomienda montar la antena en un sistema de guía motorizado, controlado por software.
- Se puede hacer un estudio en la banda Ku de la temperatura del la luna.
- Cambiando el sensor y la antena se pueden realizar estudios en la banda C.
- Se recomienda realizar un estudio del espectro de frecuencias donde su portadora se encuentre en la banda Ku, y así determinar que cantidad de armónicos que se generan en la cromosfera.



## BIBLIOGRAFÍA

ALBA, PERE SOLER I, El espectro Radioeléctrico y el estudio del sol, 2006,22.p.

BOYLESTAD, l Robert. Teoría de circuitos. Sexta edición, Prentice Hall,1997,949.p.

DUGLAS K Linder. Introducción a las Señales y Sistemas,2002,970.p.

FRANCO, Sergio,Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, 3ª. Edición, Mc Graw Hill,2005,675.p.

KRAUS, John D. RADIO ASTRONOMY. 2nd Edición, Cygnus-Quasar Books,1986,1280.p.

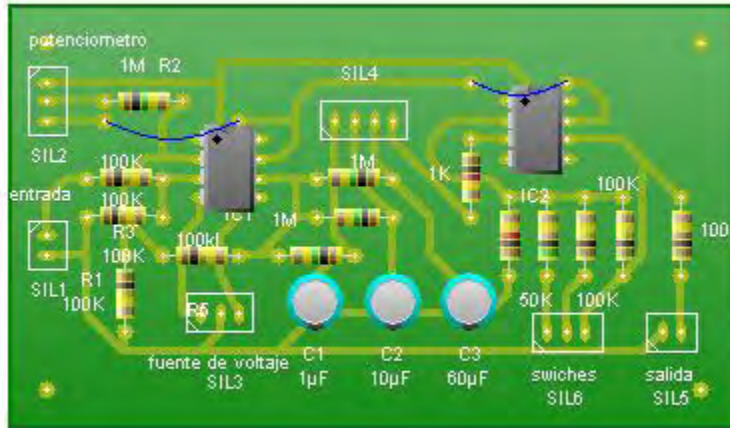
LONC, William P. Radio Astronomy Project,1999,120.p

REITZ, John R Milford, Frederick j. CHRISTY Robert w. Fundamentos de Teoría Electromagnética, Bogotá, fondo educativo interamericano,1984,584.p.

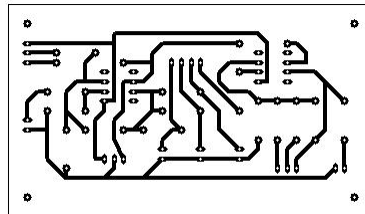
# ANEXOS

# ANEXO A

## ETAPA AMPLIFICADORA

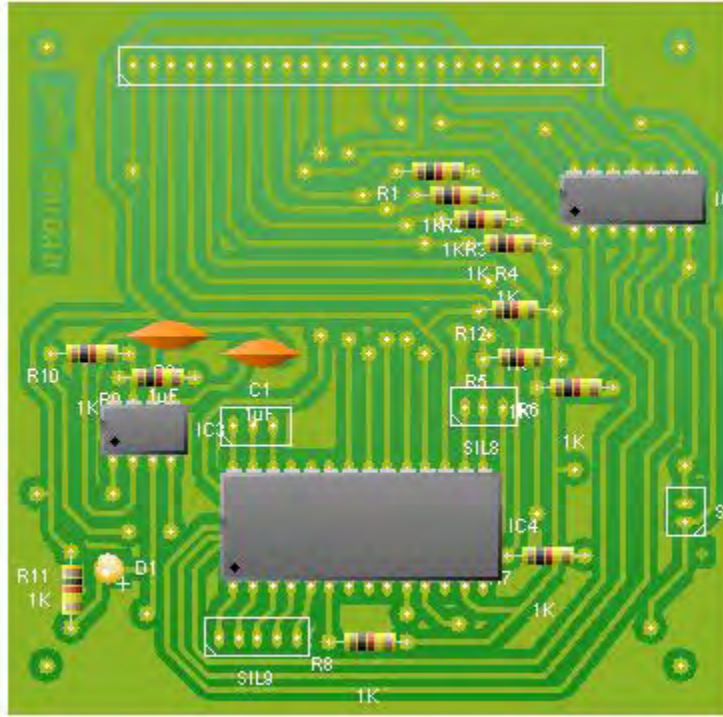


*Tarjeta del impreso*

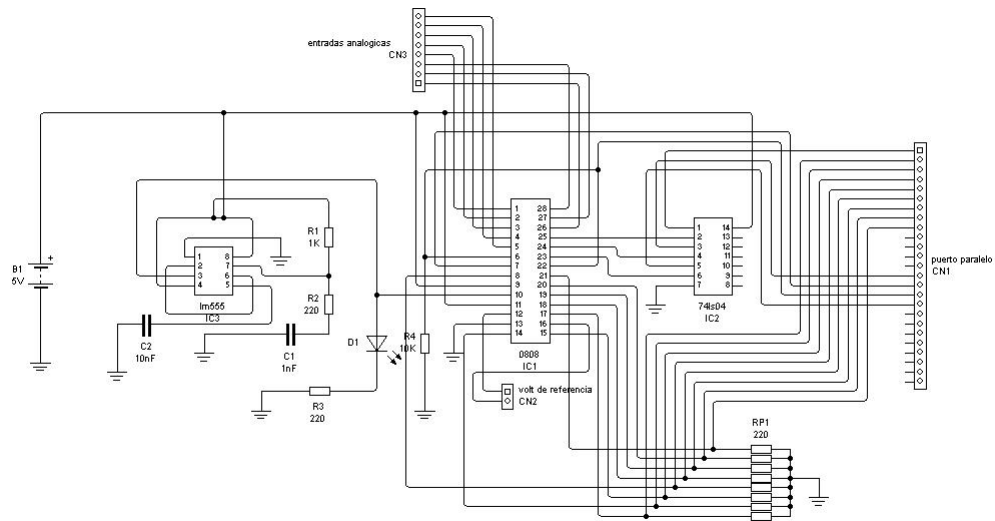


*Circuito impreso a tamaño real*

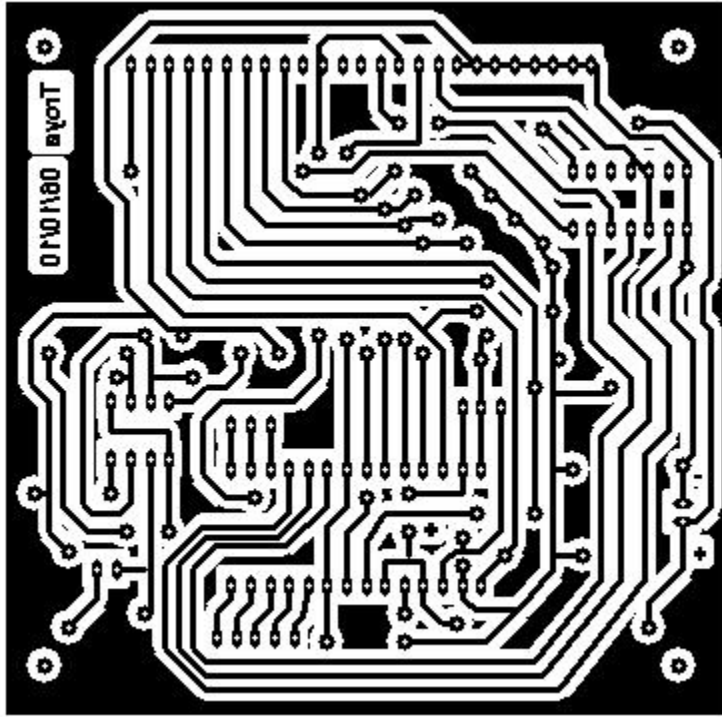
## ANEXO B ETAPA DE DIGITALIZACION



*Tarjeta del impreso*

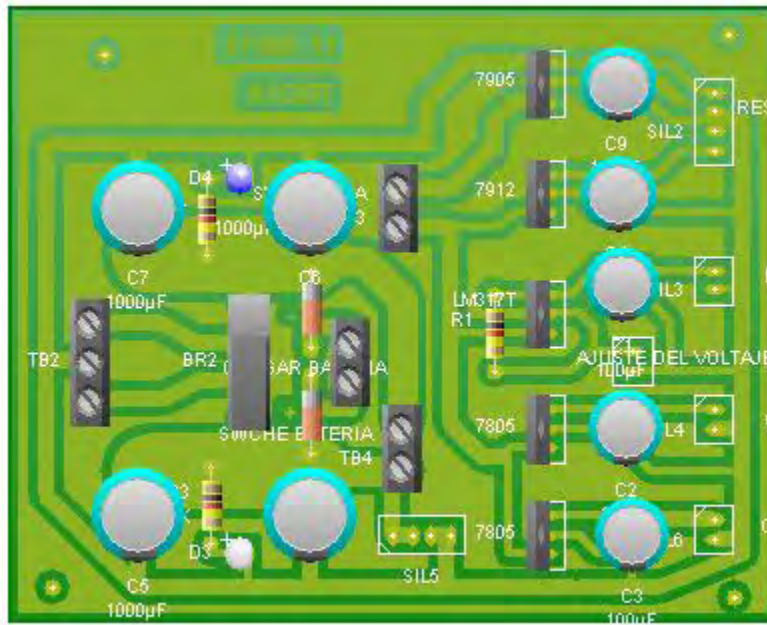


*Plano eléctrico de la fuente*

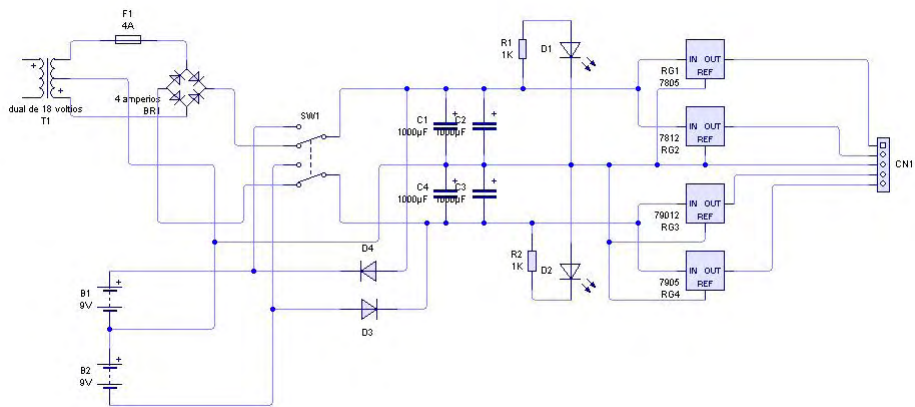


*Impreso a tamaño real*

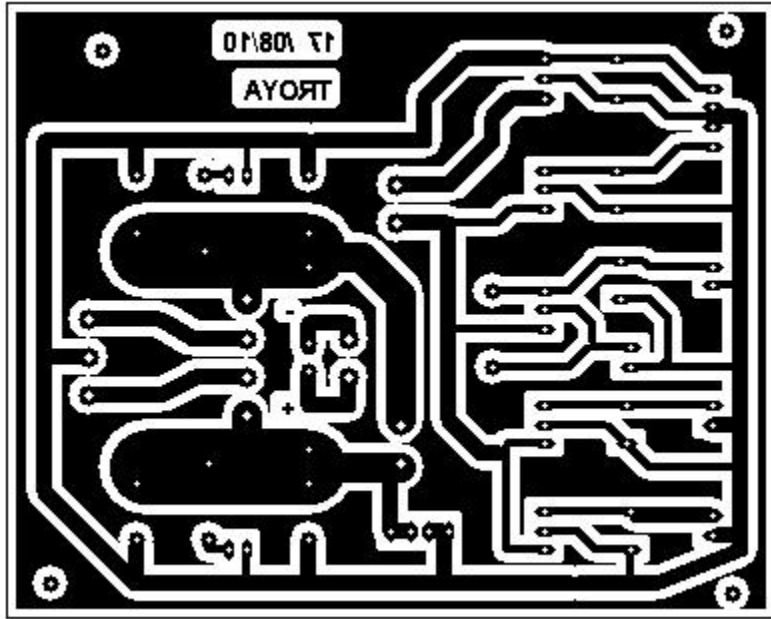
## ANEXO C FUENTE DE PODER



*Tarjeta del impreso*

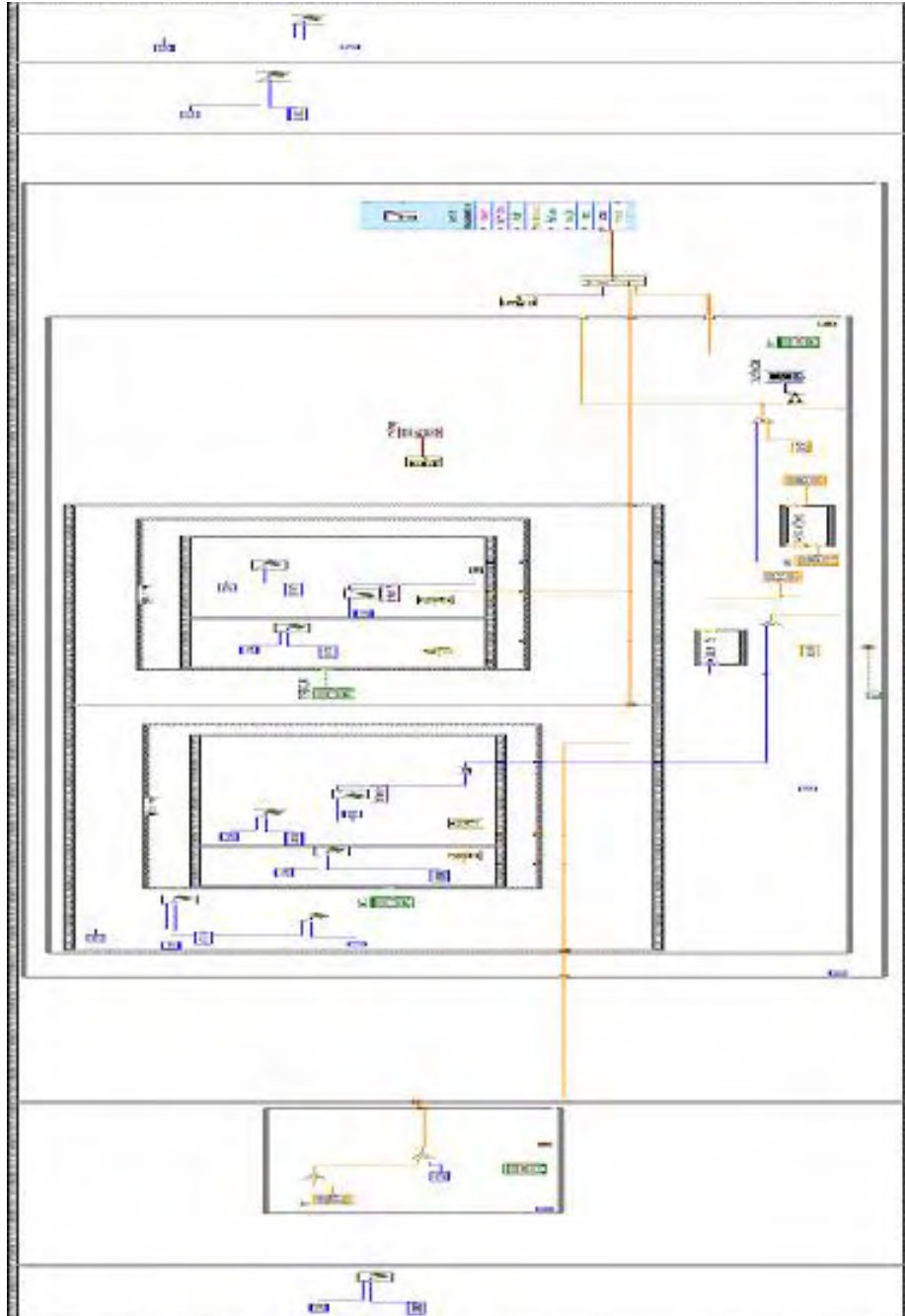


*Plano eléctrico de la fuente*



*Impreso a tamaño real*

ANEXO D  
PROGRAMA RADIO TELESCOPIO



*Programa realizado en lenguaje LABview*



## ANEXO E PROGRAMA PARA AJUSTAR EL PATRÓN DE ANTENA

**NOTA LOS DATOS .TXT EN BLOCK DE NOTAS, PRIMERA COLUMNA GRADOS, SEGUNDA VOLTAJE**

```
clear all;
load fi16.tx ————— ingrese aqui el nombre del archivo
a = fi16; ————— cambia el nombre del archivo
ex= 0.5; ————— cambia el error en x
ey= 0.01; ————— cambiar el error en y
x=a(:,1); ————— toma la coordenada x de la señal pulso,la instrucción es matriz
a columna 1. En general a(f,c); fila columna
y=a(:,2); ————— toma la coordenada y de señal
x1=x(1);
lx=length(x);
```

---

**Construcción del vector error, vector constante de la misma longitud de las variables**

```
for i=1:1:lx
e1(i)=ex;
end
for i=1:1:lx
e2(i)=ey;
end
```

---

```
xf=x(lx); ————— entrega el valor del ultimo valor de x
xx = xf:0.01:x1; ————— -se crea un vector de la misma longitud de x con incremento
0.01, se debe ajustar el tamaño del vector al rango de los datos en x
tx=xx'; ————— - solamente para observar el vector
yy = spline(x,y,xx); ————— AJUSTA LA CURVA INTERPOLACION
ty=yy';
```

---

**Gráficas de interpolación y de error**

```
xyerrorbar(x,y,e1,e2,'o'); ————— gráfica el error de las coordenadas x y
title('PATRON DE ANTENA ANGULO AZIMUTAL');
xlabel('Angulo (Grados)');
ylabel('Voltaje (Voltios)');
[mvy,psy]=max(yy); ————— calcula el máximo del vector y lo ubica mvy , y el
valor máximo valor de posicion en psy
ny = mvy*0.7079 ————— valor de -3db del maximo
```

## ANEXO F ESTADÍSTICA DE LA OBSERVACIÓN

### 1- MÉTODOS DE MEDICIÓN

En el laboratorio se suele clasificar los métodos de medición en tres tipos:

**Método directo:** Se compara, directamente la cantidad a medir con el patrón. Ejemplo: la medida de una masa realizada con una balanza. En este caso se compara la masa que se quiere medir con una masa conocida.

**Con aparatos calibrados:** Se establece, por calibración, una relación entre una escala graduada y un patrón de medida. Para comparar se mide la posición en la escala. Ejemplo: al medir la temperatura del cuerpo con un termómetro, se lee en la escala graduada del termómetro. El termómetro indica la temperatura del cuerpo que se encuentra en contacto con él.

**Método indirecto:** Se establece el valor de la cantidad a medir, mediante la medida de otras cantidades, las cuales están relacionadas con ella mediante una definición o una teoría. Ejemplo: para medir la densidad de un cuerpo, se mide su masa y su volumen y operando matemáticamente con estas cantidades se determina la densidad.

### 2.- ERRORES

#### 2.1.- ERROR DE LECTURA

Todas las cantidades físicas se miden, inevitablemente, con algún grado de incertidumbre, generada por las imperfecciones de los instrumentos de medida, por fluctuaciones estadísticas incontroladas durante el proceso de medición, o por a las limitaciones de nuestros sentidos. Por ende, las cantidades físicas no se pueden expresar como un número real; sino como un intervalo. Así, por ejemplo, al medir una longitud  $L$  directamente con una regla, se encuentra que es igual a 12.3 cm; pero, ¿podemos asegurar que ese es exactamente el valor de la longitud?. Debido a nuestras limitaciones visuales es imposible decir precisamente donde cae el final del objeto sobre la regla; es entonces conveniente dar un intervalo dentro del cual podemos asegurar que se encuentra la longitud.

Para determinar ese intervalo debemos preguntarnos cuales son los valores máximo y mínimo que puede tener esa longitud. Supongamos que en el ejemplo anterior se determinó que la longitud  $L$  está con toda seguridad entre 12.25 cm y 12.35 cm, este resultado se expresa de la siguiente manera:

$$L = (12.30 \mp 0.05) \text{ cm.}$$

Lo cual muestra que al sumar o restar 0.05 cm al valor central 12.30 cm, obtenemos los valores límites o fronteras del intervalo.

A la cantidad que sigue al símbolo  $\mp$  se le llama error absoluto de la medida de la cantidad física  $L$  o simplemente error absoluto de  $L$ . En este caso el error proviene de la lectura del instrumento, y se le clasifica como error de lectura. Es conveniente notar que es deseable que el error de lectura sea lo más pequeño posible, pero, no hay reglas establecidas para determinar dicho error; debemos usar el sentido común y la honestidad.

En general, ninguna medición física puede dar un valor absolutamente exacto de una cantidad física (un valor rigurosamente exacto tendría en principio, infinitas cifras decimales). Debido a estas limitaciones de las mediciones, cuando hablemos, en adelante, del “valor verdadero” de una cantidad física, siempre habrá que entenderlo sólo como una abstracción. Incluso con los más perfeccionados medios que nos ofrece la técnica, siempre se obtienen valores numéricos afectados de un margen de error, que puede ser muy pequeño pero nunca nulo.

## 2.2.- ERROR DE OBSERVACIÓN

La diferencia entre el valor medido de una cantidad física y el valor verdadero se llama error de observación. Por supuesto, como el valor verdadero no es conocido, tampoco lo es el error de observación.

## 2.3.- APRECIACIÓN Y ESTIMACIÓN

La apreciación de un instrumento es la menor medida que se puede registrar con él (el mínimo valor de una división de la escala graduada).

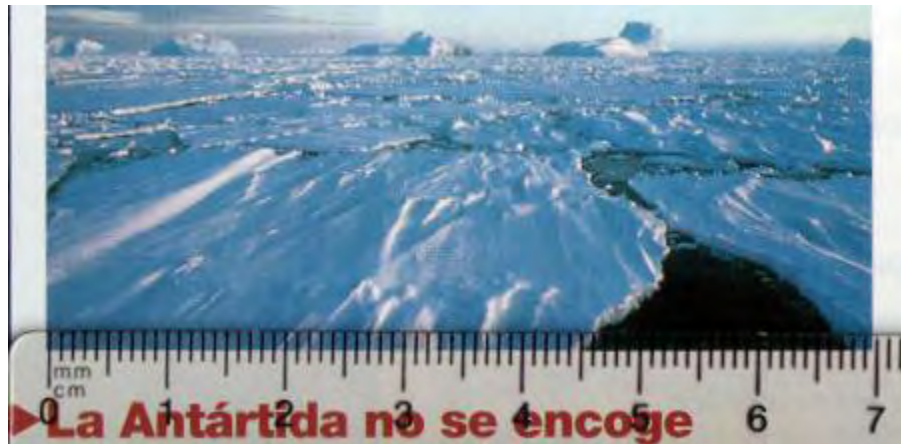
Por ejemplo: las reglas graduadas tienen como apreciación 1 mm (la menor división representa 1 mm). Al medir con una de estas reglas, el observador puede leer con certeza hasta 1 mm. Por eso, al reportar una longitud medida, tiene que hacerlo con una incertidumbre de fracciones de milímetro, que son las longitudes que no logra apreciar con ese instrumento.

Luego, el error en la medición debido a la apreciación del instrumento, es el menor intervalo que el observador puede discernir en la escala de ese instrumento, y se denomina estimación de una lectura o error de apreciación del instrumento. Muchos textos toman como tamaño de este intervalo, la apreciación, de esta manera la estimación o error de apreciación, es:

$$\pm \frac{\text{apreciacion}}{2}$$

Así, si medimos con la regla, una longitud  $L$  de 69 mm (Fig. 1) debemos reportar una medida de:

$$L = (69 \pm 0,5)mm$$



## 2.4.- ERRORES SISTEMÁTICOS

Son los errores de observación producidos por imperfecciones en los instrumentos de medida o por deficiencia en el método experimental. Pueden ser constantes o variar en forma regular. Tienden a desviar el valor de una medida en una sola dirección, esto es, dan valores siempre mayores o siempre menores que el valor verdadero. Son difíciles de eliminar porque no se pueden detectar por observaciones repetidas. Sus causas principales son las calibraciones erróneas o los defectos internos de los aparatos de medición. Así, si las divisiones de una regla graduada son demasiado grandes o demasiado pequeñas, las longitudes que se midan con ella, tendrán sus valores numéricos mayores o menores que el valor verdadero. También es causa de errores sistemáticos los defectos regulares en el proceso de medición, por ejemplo; la tendencia del observador a ubicarse mal frente al instrumento (error de paralaje), lo que ocasiona que siempre mida con exceso o con defecto.

En principio se pueden minimizar este tipo de errores, calibrando lo más exactamente posible los instrumentos de medición y corrigiendo adecuadamente el método empleado para medir cada cantidad física.

## 2.5.- ERRORES CASUALES

Son los errores de observación producidos por causas no controladas o desconocidas, siendo el propio observador la causa más determinante; ante todo, la limitada capacidad de discriminación de su visión al leer las lecturas y, eventualmente, la destreza de sus manos al efectuar la medida. En la medición de la longitud de un segmento recto con una regla graduada, ponen un límite a la exactitud, la destreza manual y la agudeza visual del operador cuando trata de hacer coincidir la escala graduada con el borde inicial del segmento a medir. Asimismo, es inexacta la lectura del lugar donde acaba el segmento junto a la regla. De ahí que la repetición reiterada de la medida de la longitud del segmento, no dé siempre el mismo valor. Unas veces, los pequeños errores cometidos en la lectura de los extremos obrarán casualmente en el mismo sentido sobre

el resultado y darán un aumento o una disminución del mismo; otras veces ocurrirá que, casualmente, influirán en sentidos opuestos, contrarrestándose mutuamente en mayor o menor grado. Por consiguiente los diversos resultados de una serie de mediciones presentarán una dispersión en torno al valor medio.

Los distintos valores de las mediciones se acumularán en las proximidades del valor medio y serán cada vez más escasos a mayores distancias de éste (la demostración formal de este comportamiento, nos la da la ley de distribución de errores de Gauss) como se ilustra en la figura 2. La figura 3 muestra la curva normal de la distribución continua de Gauss, a la cual tiende la distribución discreta de medidas, cuando su número es muy grande.

Prescindiendo de los errores sistemáticos, en principio, sólo podremos afirmar que el valor verdadero se halla, con gran probabilidad, dentro del dominio de dispersión, y en la región de máxima acumulación de las distintas medidas. Si tomamos como resultado del proceso de medición, el valor medio, evidentemente, no tendremos la certeza de que sea igual al valor verdadero, siempre queda la incertidumbre acerca de la discrepancia entre dicho promedio y el valor verdadero, pero, es el mejor valor que sobre la base de nuestras medidas podemos reportar. Además, se demuestra fácilmente, que al aumentar la cantidad de medidas, esta discrepancia se reduce considerablemente, pudiendo ser menor que el error sistemático.

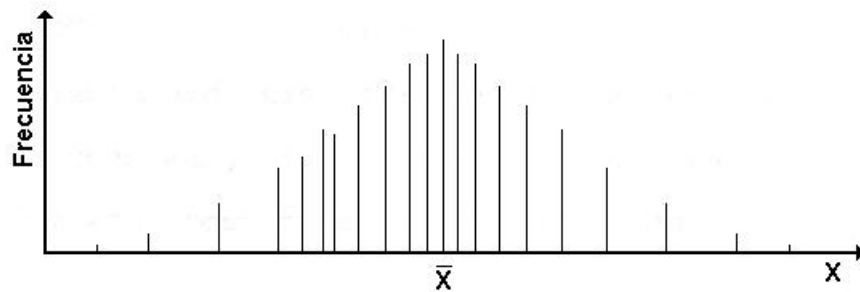


Figura 2

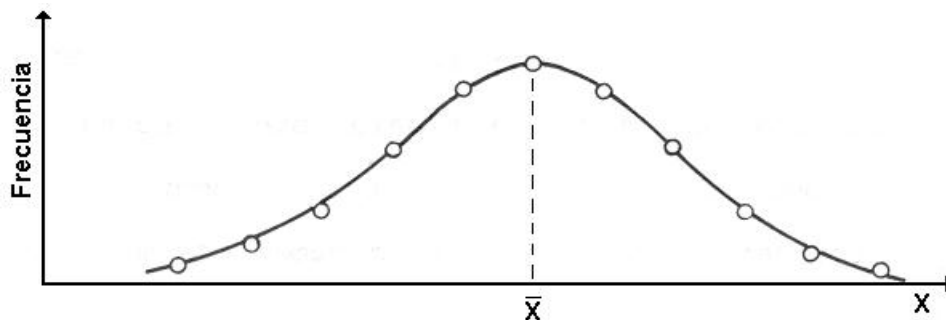


Figura 3

### 2.5.1.- EL MEJOR VALOR DE UNA MEDICIÓN Y EL ERROR ESTADÍSTICO.

Consideremos ahora una medición algo diferente al ejemplo anterior; supongamos que deseamos conocer el tiempo de vuelo de un objeto en caída libre desde cierta altura. Al medir con un cronómetro  $n$  veces ese tiempo, seguramente, encontraremos diversos valores  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . En este caso, ¿cuál es el valor del tiempo de vuelo a reportar? y ¿cuál es su error?.

Como acabamos de ver: el tiempo de vuelo debe estar entre el máximo y el mínimo de la serie de medidas y, tomaremos como el mejor valor la media aritmética “ ” de los valores medidos. Esta media está dada por:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum t_i$$

Y al aumentar el número  $n$  de medidas, este promedio tiende al valor verdadero de la medida. ¿cuál es la desviación promedio de las medidas  $t_i$  con relación al valor medio?. La teoría nos da como medida de esta desviación promedio, la desviación estándar de la distribución de las medidas, la cual operacionalmente está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{(n-1)}}$$

Ésta cantidad es el error estadístico de cada una de las medidas  $t_i$ .

La ciencia estadística afirma, que con una probabilidad del 68 por-ciento, cualquiera de los tiempos medidos difiere del valor medio en  $\pm\sigma$ , la probabilidad de que se encuentre dentro del intervalo  $\bar{t} \pm 2\sigma$  es del 95.5 por-ciento y, de un 99.7 por-ciento para el intervalo  $t = \bar{t} \pm 3\sigma$  ver ( Fig. 4).

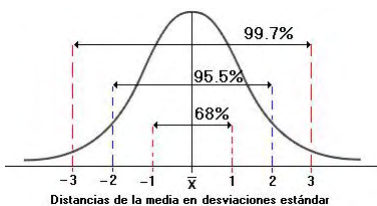


Figura 4

Como cada tiempo se mide directamente, su medida tiene un error de lectura; además, también está afectada por un error estadístico o casual, ¿cuál de los dos debemos considerar?. La respuesta es: ambos. Sin embargo, suele ocurrir que uno de ellos es mucho más grande que el otro, en ese caso tomaremos como el error de cada medida al mayor de ellos.

Respondamos ahora, la pregunta con relación al error estadístico que afecta al promedio. Una vez más recurriremos a la teoría, y esta nos dice que la desviación estándar

correspondiente a la distribución de los promedios, o sea, la desviación estándar del conjunto de los (conjunto de promedios), que obtendríamos si repitiéramos muchas veces las  $n$  mediciones, es igual a:

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum(t - \bar{t})^2}{n(n-1)}}$$

A esta última cantidad se le conoce como desviación estándar del promedio o, error estándar del promedio. Es claro que todas éstas consideraciones, son válidas para cualquier cantidad física “ $x$ ”, a medir, y no solamente para el tiempo.

Igual que muchos libros, tomaremos muy conservadoramente, el valor , para el error estadístico o estándar de la medida, de modo que el resultado de la medición se reportará como:

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x$$

### 2.5.2 NUMERO OPTIMO DE MEDIDAS

¿cuantas medidas se debe realizar?. Esta es una pregunta típica del experimentador, la respuesta obvia es tantas veces como pueda, pero el esfuerzo y el tiempo en repetir muchas veces una medición normalmente no vale la pena. Una relación que nos permite saber de una manera aproximada el numero optimo de muestras, relaciona la varianza del los datos y el erro nominal del instrumento utilizado de la siguiente manera.

$$N = \left(\frac{\sigma}{r}\right)^2$$

$r$ = resolución del instrumento utilizado.

### 2.6.- CONFIANZA DE UN RESULTADO

La confianza de un resultado viene dada por su exactitud y su precisión. Se dice que una medida es más exacta cuanto más cerca está del valor verdadero. La exactitud está asociada con la apreciación de los instrumentos de medición y con los errores sistemáticos. Cuanto más aprecia el instrumento, más exactas son las mediciones y cuanto mayores son los errores sistemáticos menor es la exactitud. La exactitud, está vinculada al promedio: mientras el promedio esté mas cerca al valor verdadero, la medida es más exacta.

**Precisión:** se refiere a la cercanía de los valore medidos entre sí, independientemente de los errores sistemáticos. Está relacionada con los errores casuales. Cuanto menores son los errores casuales, mayor es la precisión. La medición es más precisa cuanto menor

es la dispersión entre los valores individuales. La precisión está ligada a la desviación estándar.

En la figura 5 se ilustra estos conceptos, haciendo la similitud con el “tiro al blanco”, donde la diana del blanco representa el valor verdadero y los “disparos” las medidas.

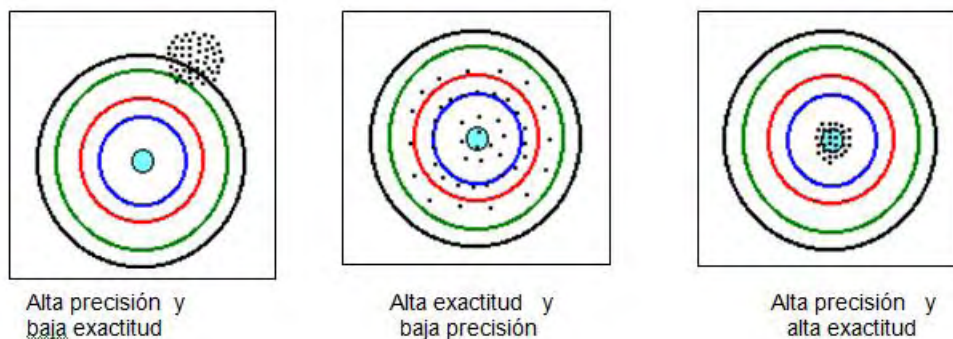


Figura 5

### 3.- CIFRAS SIGNIFICATIVAS

El número de cifras, contado desde la izquierda, a partir de la primera cifra diferente de cero, hasta la primera cifra afectada por el error, inclusive, se denomina número de cifras significativas. En el ejemplo, el tiempo (1.63s) está expresado con 3 cifras significativas. Entonces, se lo debe reportar así:

$$1,63 \pm 0,03$$

donde el error es la máxima resolución del instrumento utilizado para la medición, en este caso un cronometro. Una equivocación común es confundir cifras significativas con número de decimales. Se debe observar que en el ejemplo, el número de cifras significativas del tiempo es 3, mientras que el número de decimales es 2.

### 4.- ERROR RELATIVO- ERROR PORCENTUAL

Como hemos visto, podemos establecer que para especificar una cantidad física medida se requiere de al menos tres partes:

- Un número con ciertas cifras significativas, que representa la cantidad medida
- El error que afecta a la medida.
- Las unidades de la cantidad medida, y del error de esa cantidad (deben ser iguales).

Entonces, cualquier cantidad X medida en el laboratorio puede ser reportada como:



$$X = (\bar{X} \pm \Delta X)U$$

siendo  $\Delta X$  el error absoluto de la cantidad  $X$ , y  $U$  sus unidades. A la relación

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X}$$

Se denomina **error relativo de X**. Observe que  $\Delta X$  tiene las mismas unidades que  $X$ , mientras que el error relativo no tiene unidades. Otra manera muy común de indicar el error relativo es mediante:

$$\varepsilon \% = \left(\frac{\Delta X}{X}\right) \times 100$$

a esta cantidad se llama el **error porcentual** de  $X$ .

Es común expresar de manera alterna una medición como:

$$X = \bar{X} \pm \varepsilon \%$$

## 5.- PROPAGACIÓN DE ERRORES

### 5.1.- MÉTODO DE LAS DERIVADAS PARCIALES

En la mayoría de las mediciones físicas, se busca determinar cantidades que se obtienen mediante el cálculo, a partir de una o varias cantidades medidas directamente, dando así origen a un resultado indirecto. La estimación del error del resultado final a partir de los errores de las cantidades medidas directamente, se conoce como propagación del error.

Ya que generalmente los errores de medida son pequeños en comparación con las cantidades medidas, y que la gran mayoría de las funciones usadas en Física son derivables, se puede hacer uso del cálculo diferencial, para propagar el error. Como ejemplo consideremos que la cantidad a medir  $f$ , no se puede medir directamente, sino, a través de otra cantidad  $x$ , que la condiciona mediante una relación funcional:

$$f = f(x)$$

Sea  $\Delta X$  el error absoluto de  $X$ ; este error propaga un error  $\Delta f$  en la cantidad  $f$

$$f \pm \Delta f = f(x \pm \Delta x)$$

Desarrollando en serie de Taylor el segundo miembro se tiene:

$$f \pm \Delta f = f(x) \pm \frac{\partial f(x)}{\partial x} \Delta x \pm \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial^2 x} (\Delta x)^2$$

Despreciando los términos que tienen potencias mayores que uno en  $\Delta x$ , se tiene para el error absoluto de  $f$

$$\Delta f = \pm \frac{\partial f(x)}{\partial x} \Delta x$$

y para el error relativo:

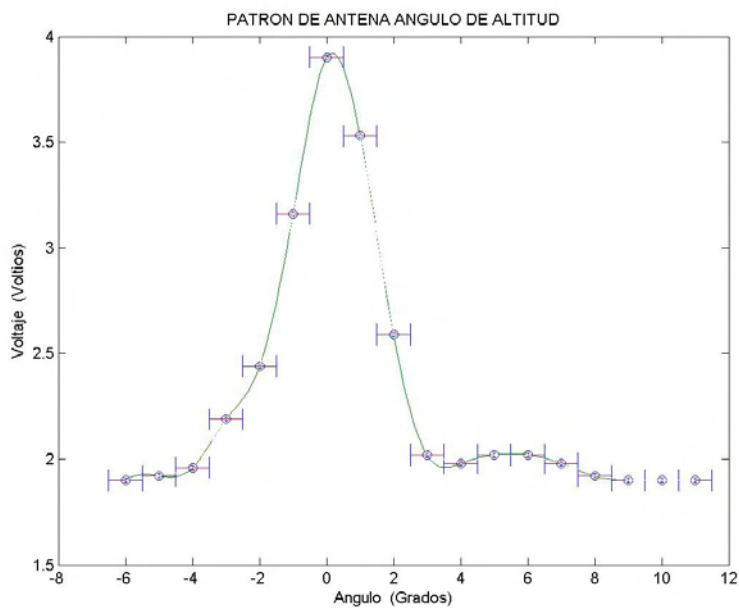
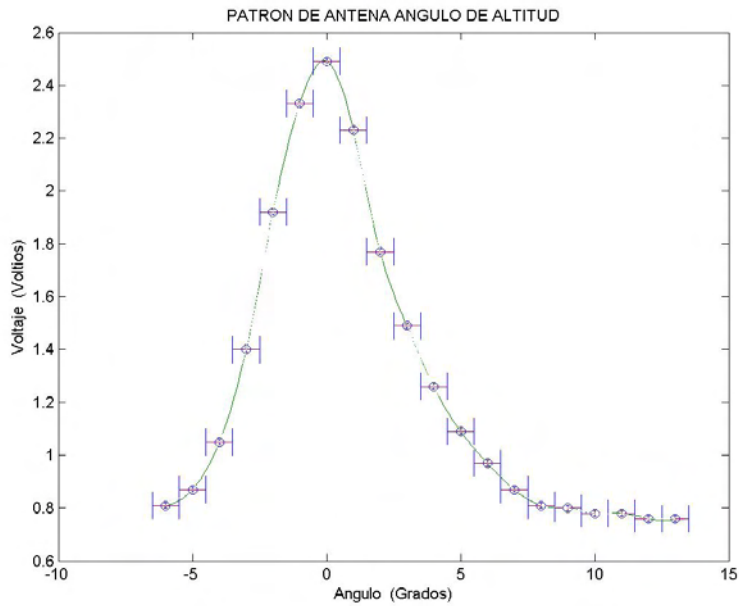
$$\frac{\Delta f}{f} = \pm \frac{\partial f(x)}{\partial x} \frac{\Delta x}{f(x)}$$

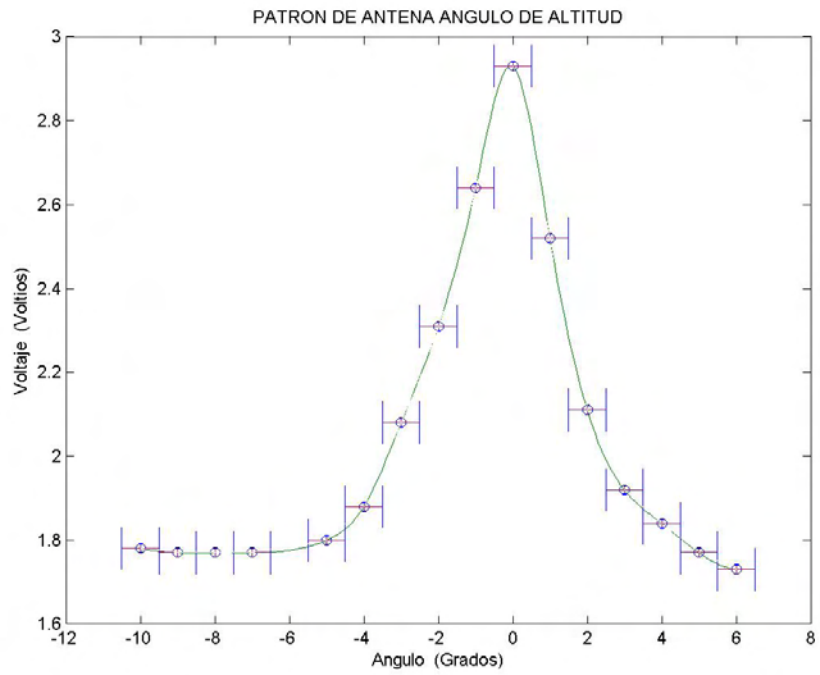
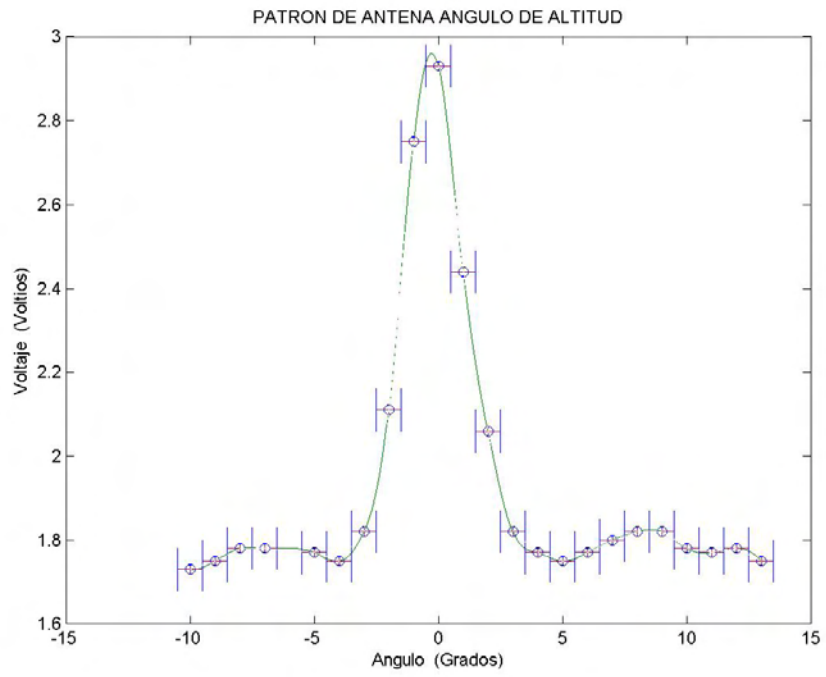
Si la cantidad  $f$  es función de varias cantidades independientes:  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , donde cada una de las cantidades  $x_i$  tiene un error absoluto  $\Delta x_i$ . Entonces el módulo del error absoluto  $\Delta f$  estará dado por:

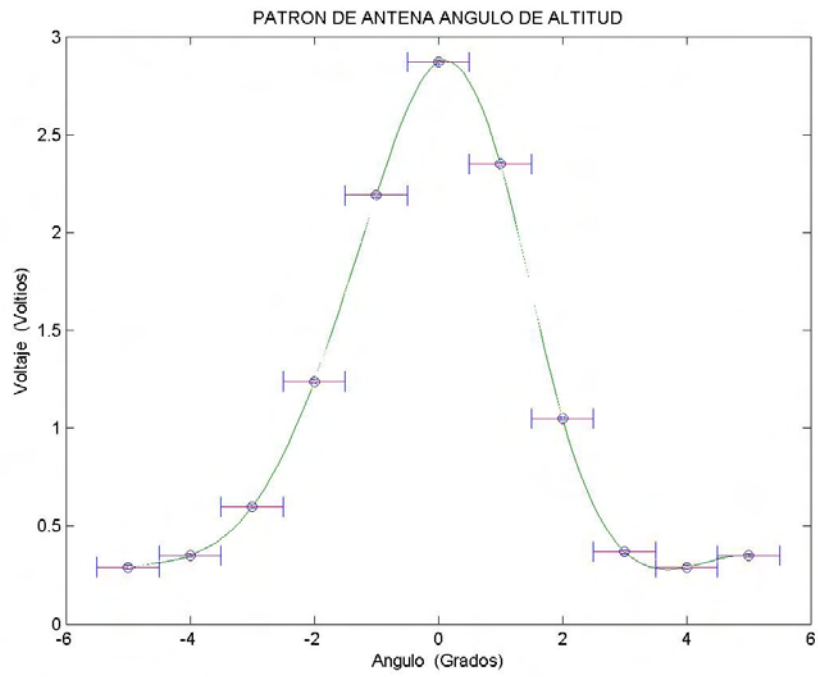
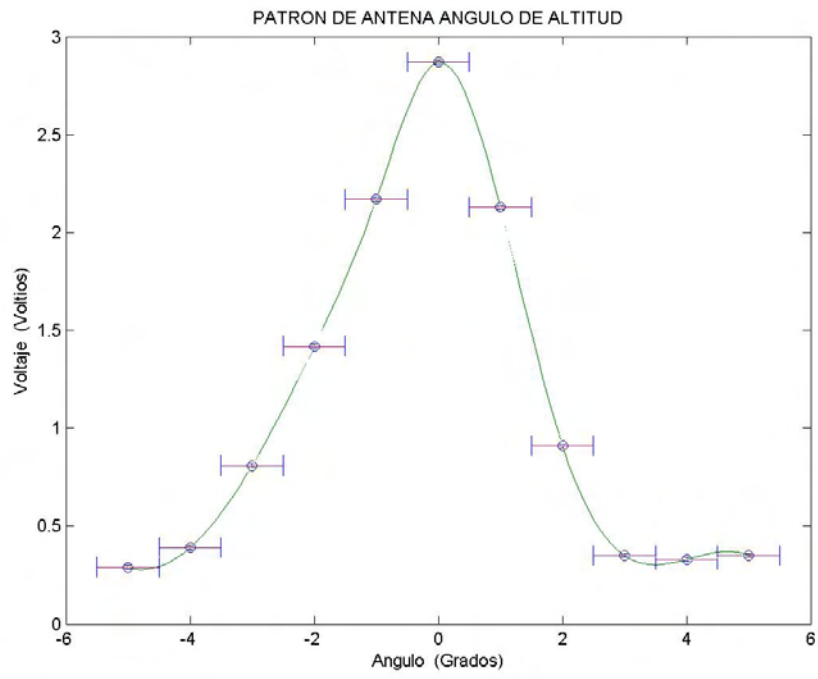
$$\Delta f = \left| \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f(x)}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \left| \frac{\partial f(x)}{\partial x_3} \right| \Delta x_3 + \dots$$

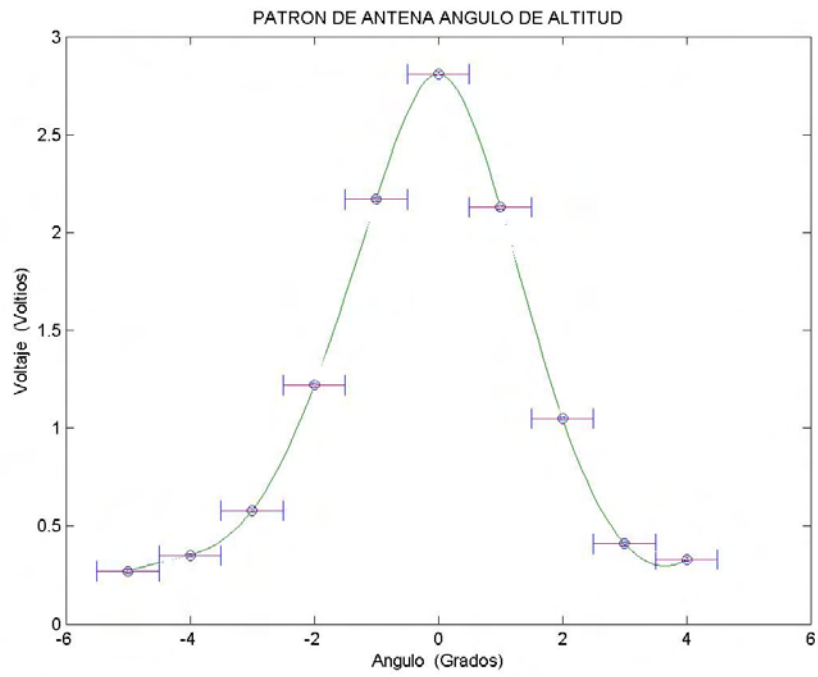
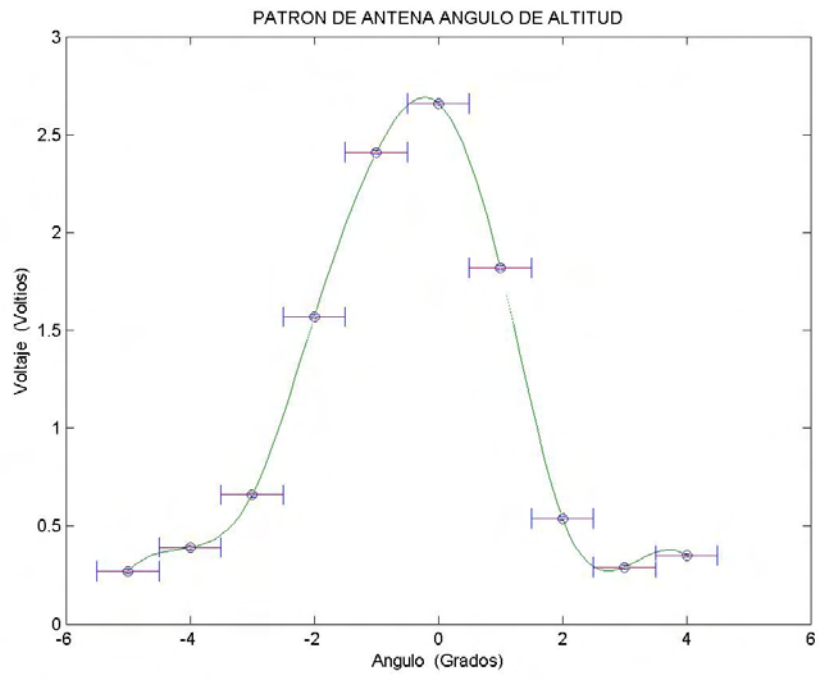
## ANEXO G SEÑAL CORRESPONDIENTE A PATRÓN DE ANTENA

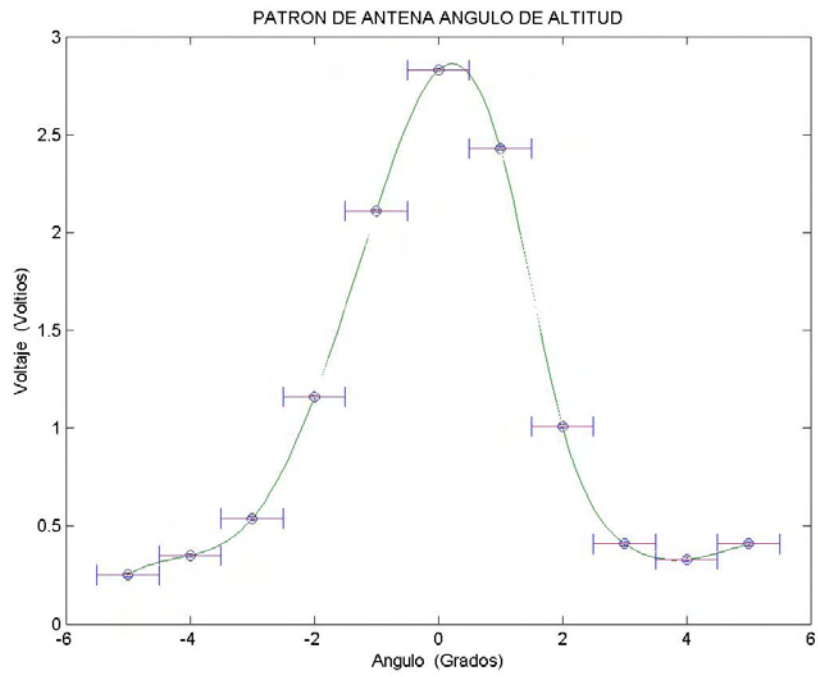
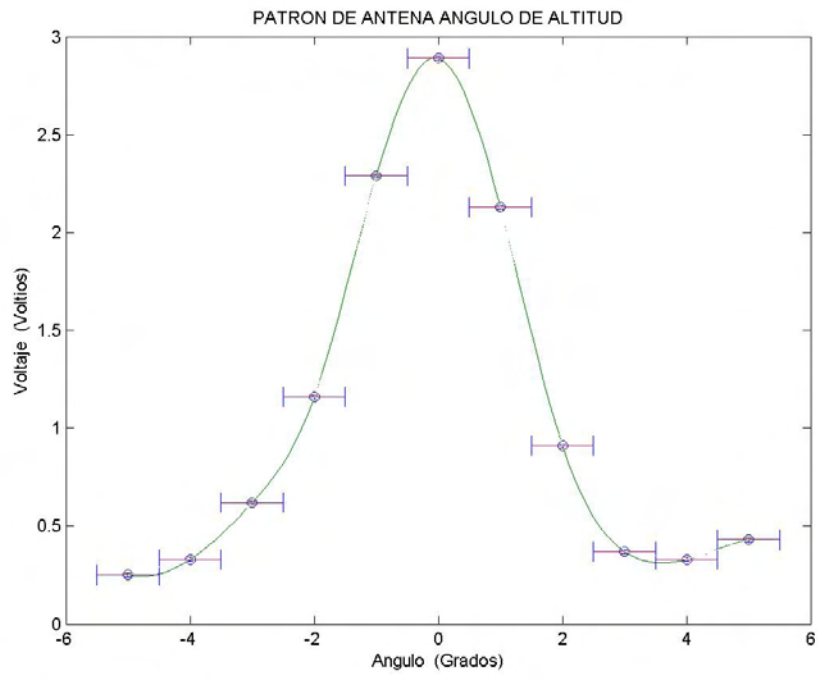
Gráficas de la curva experimental del patrón de antena RCA, la fuente de radiación satélite geoestacionario. El eje vertical presenta un error de 0,01 voltios y el eje horizontal un error de 0,5 grados.

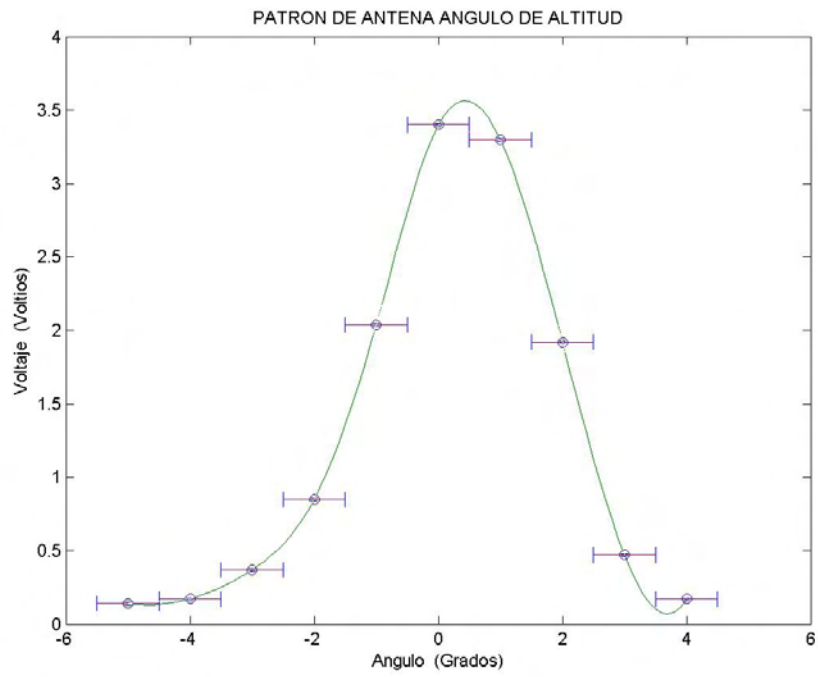
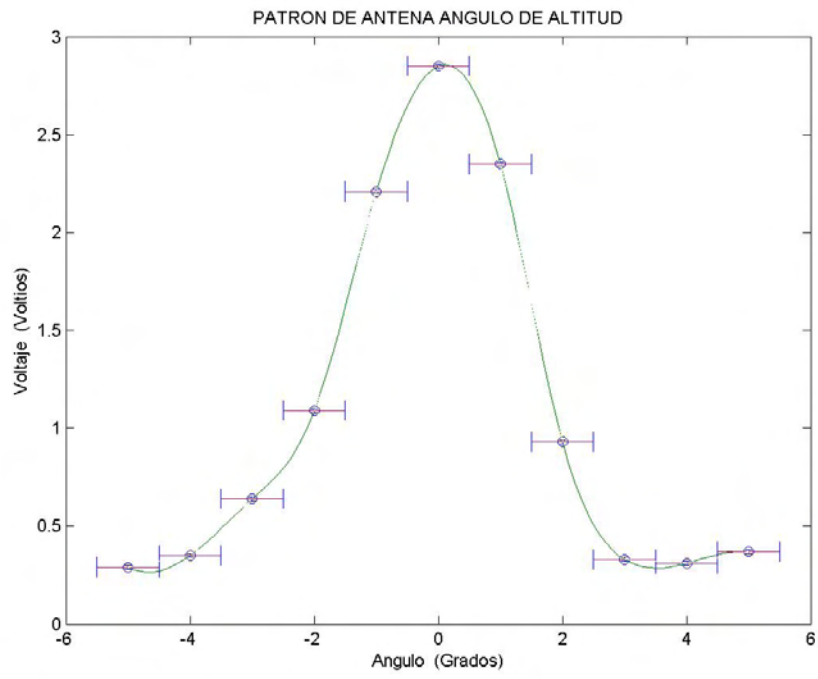




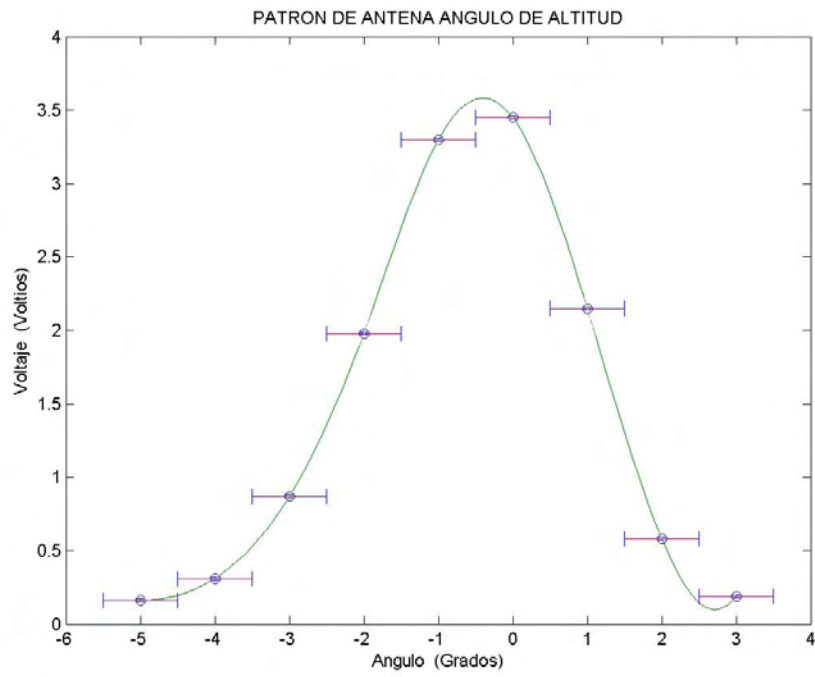
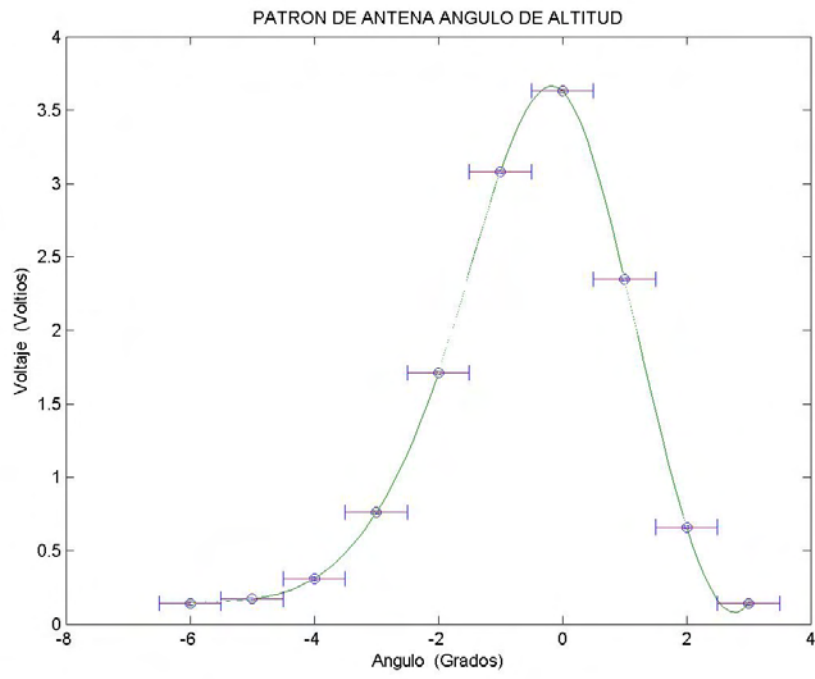


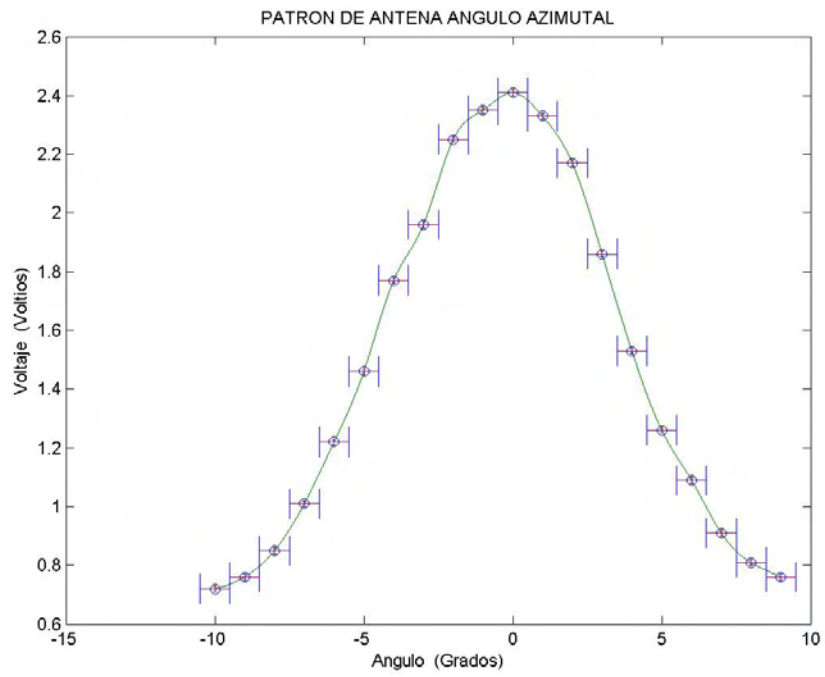
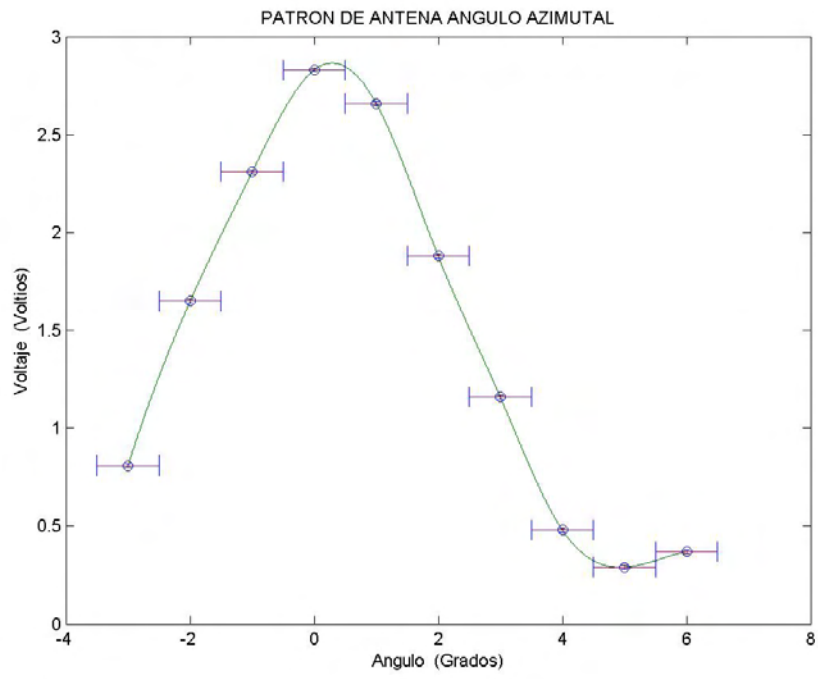


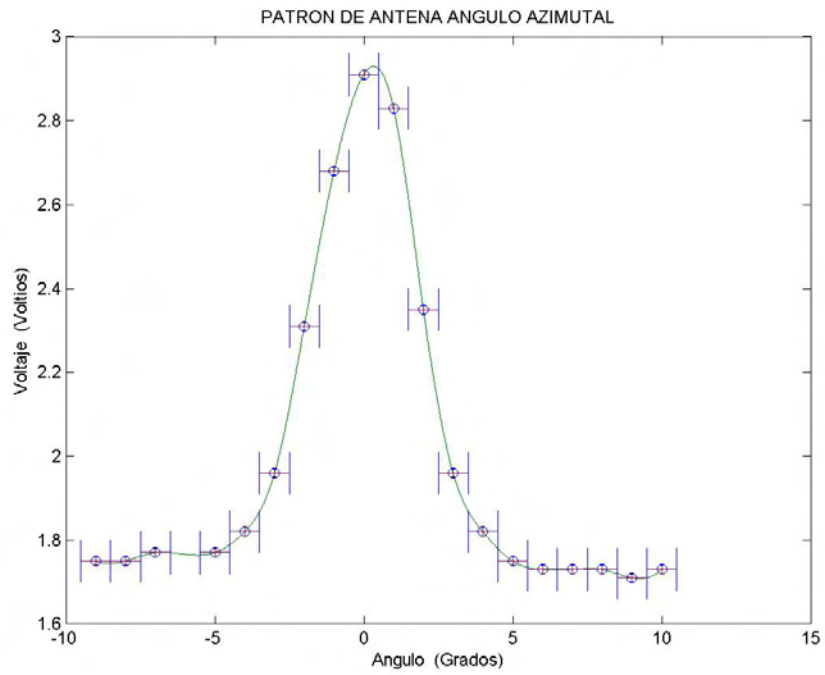
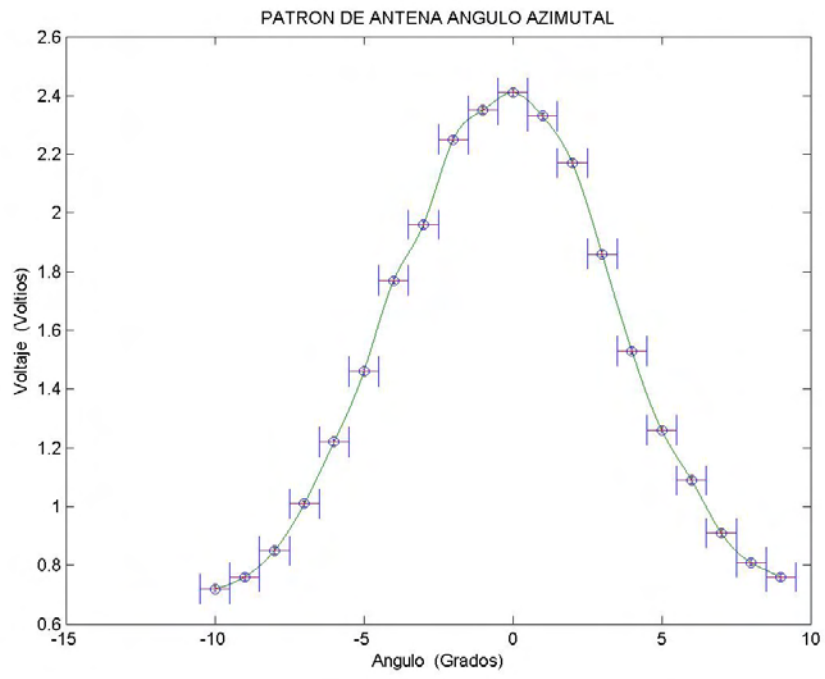


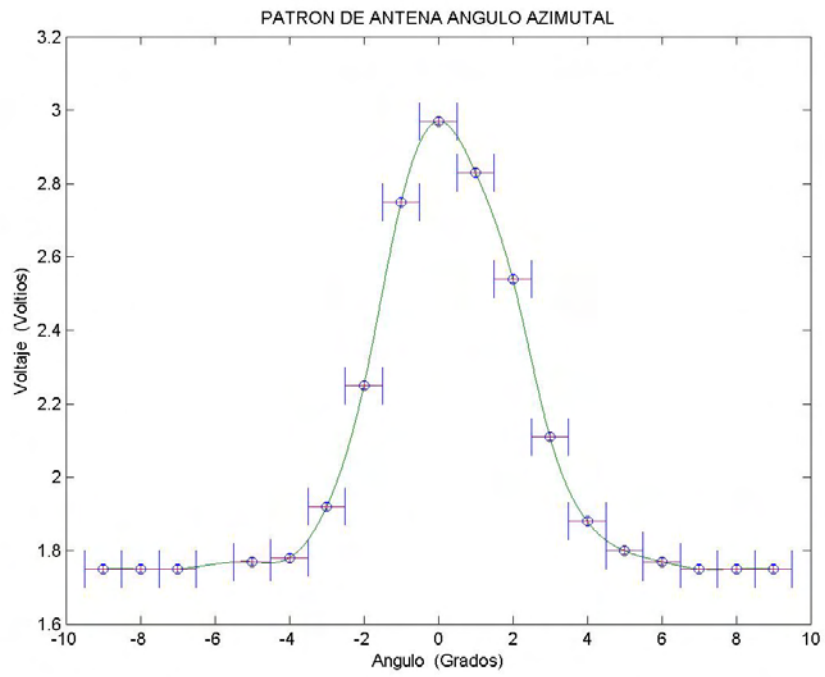
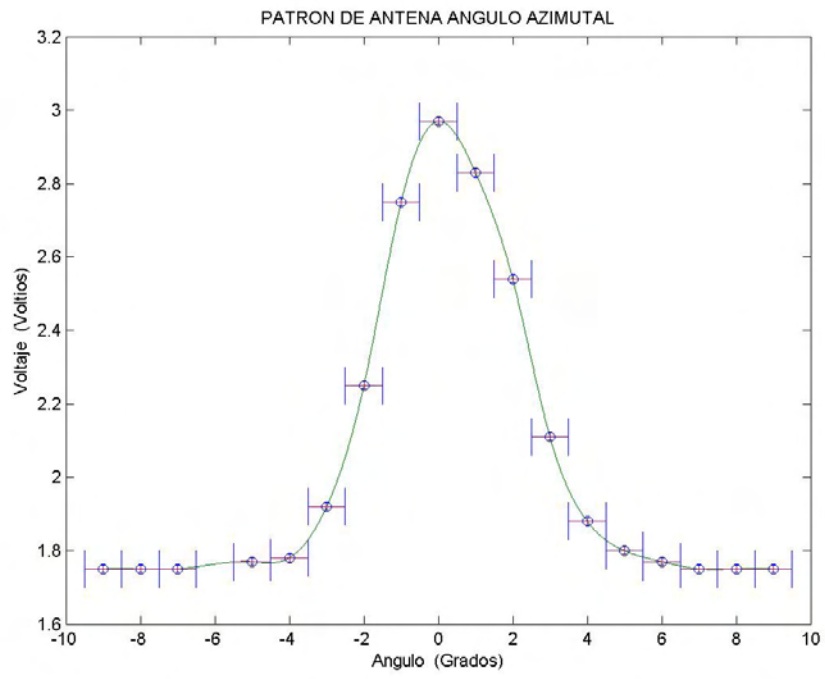


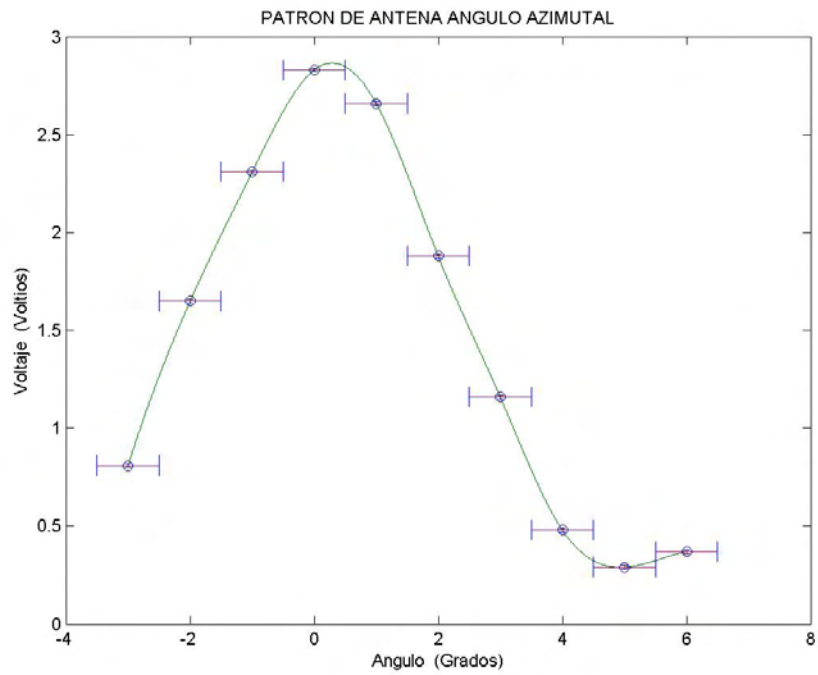
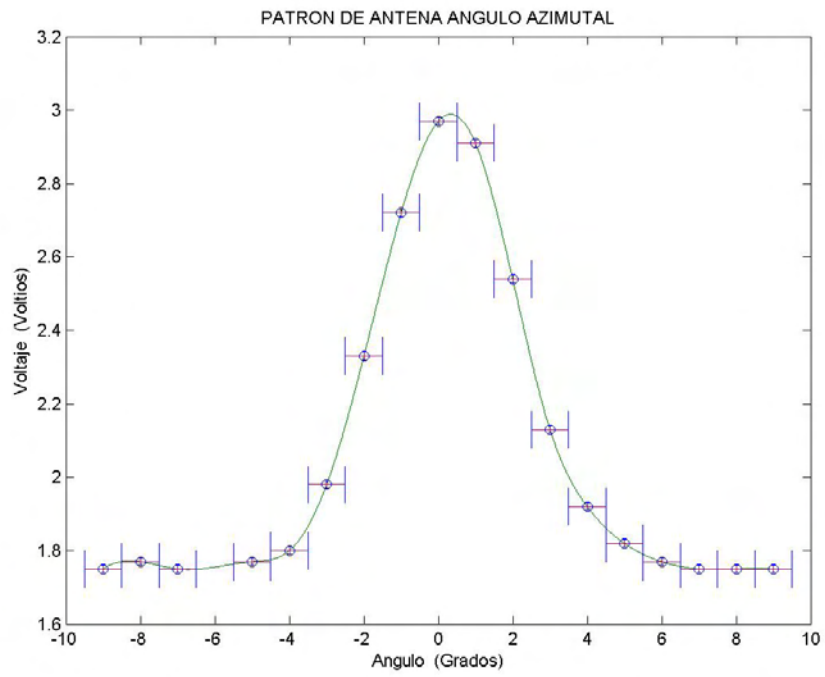


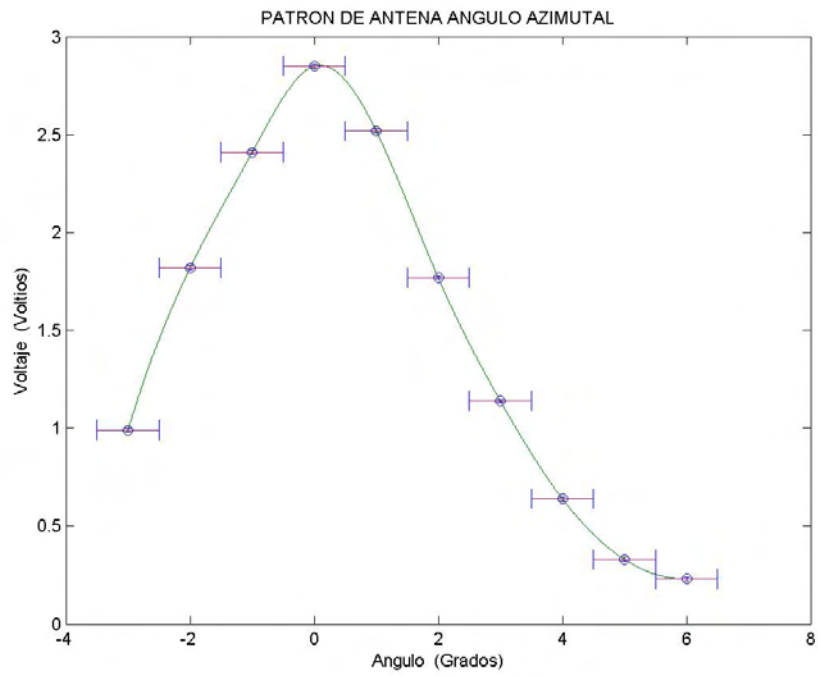
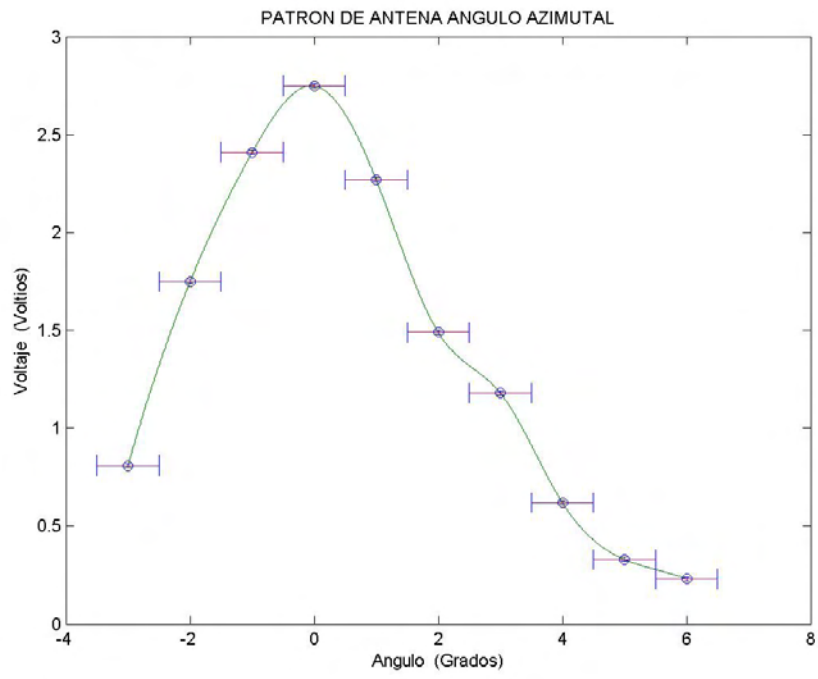


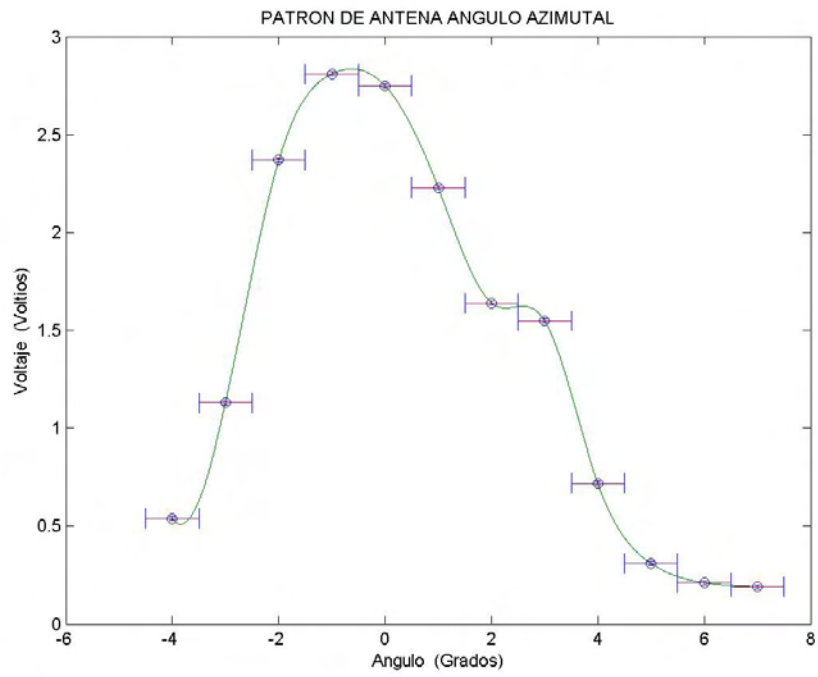
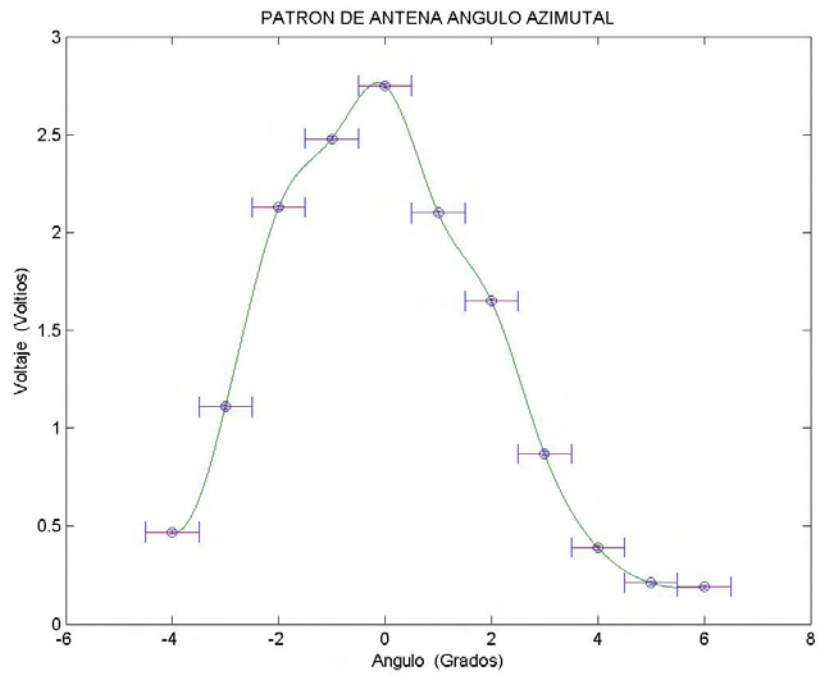


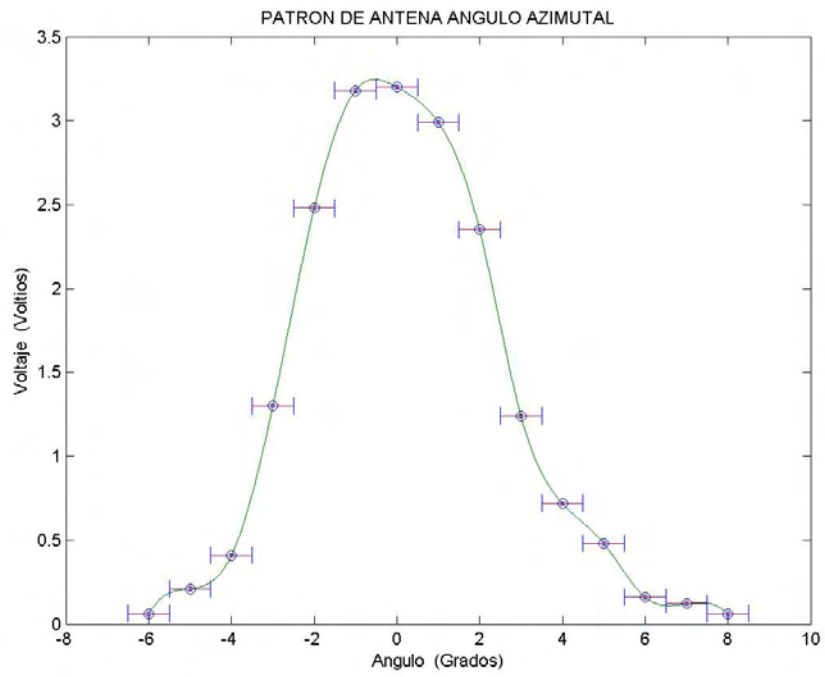
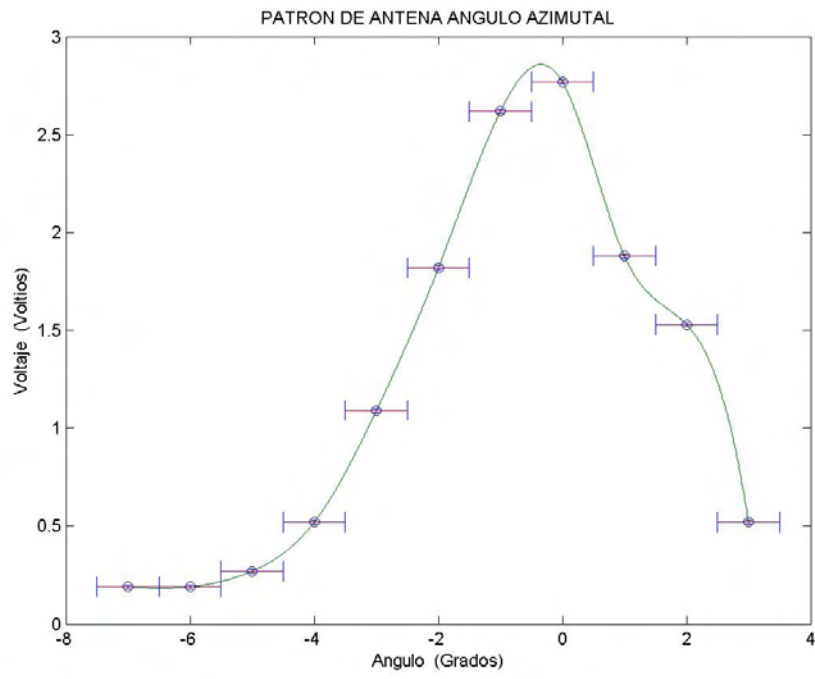




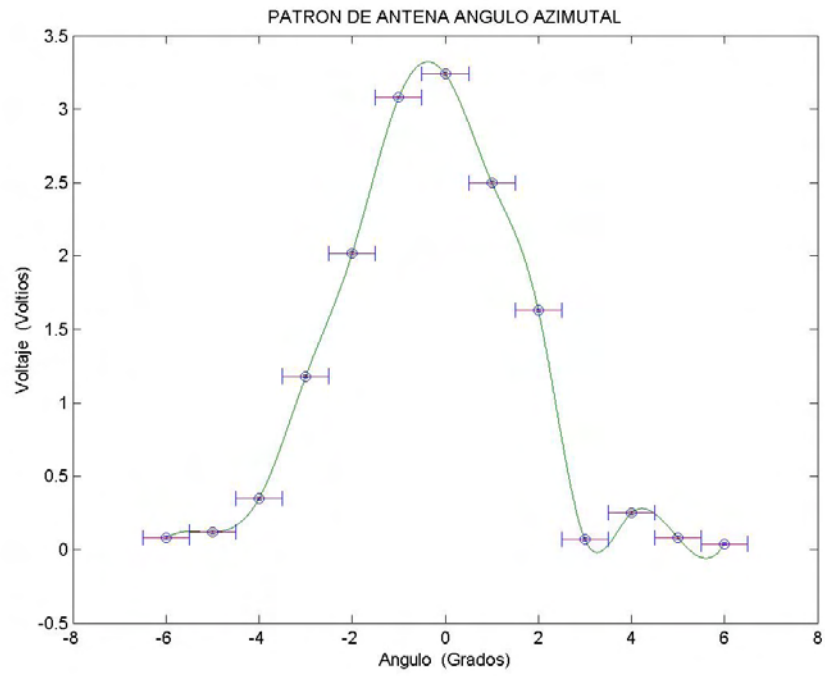
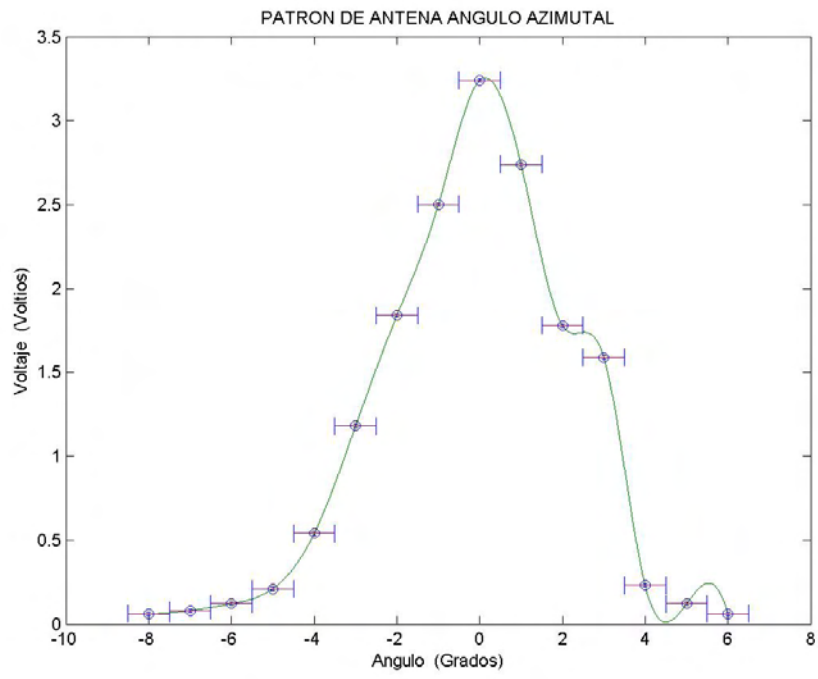




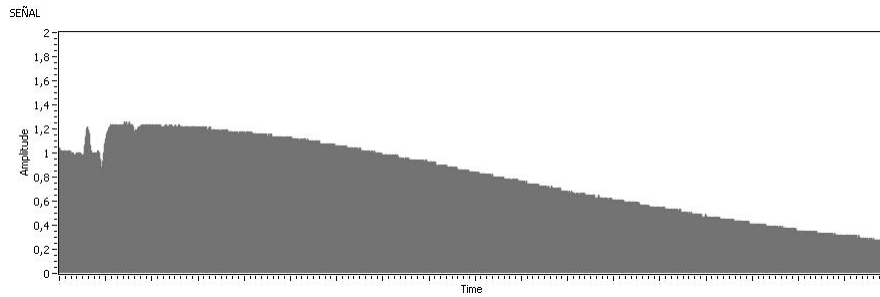




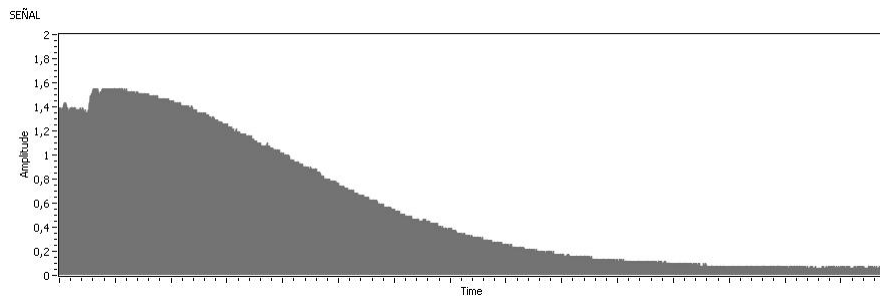




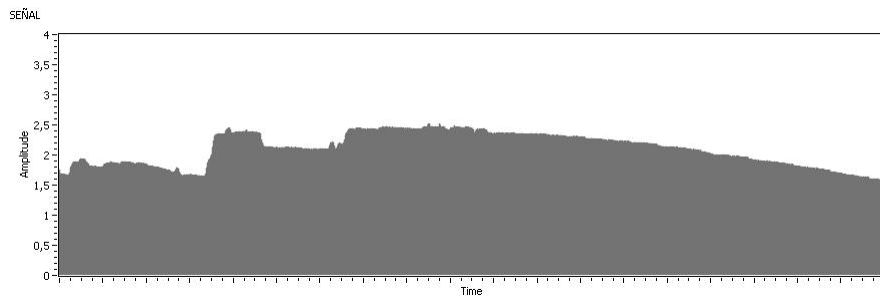
ANEXO H  
SEÑAL DE VOLTAJE CORRESPONDIENTE OBSERVACIONES SOLARES



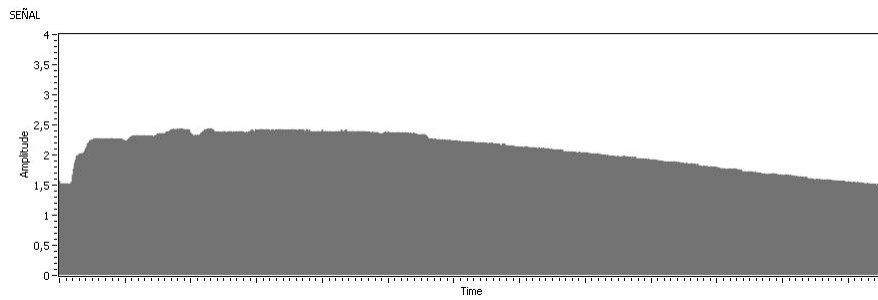
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2011/10/05 hora: 6:20 UT, Q=7*



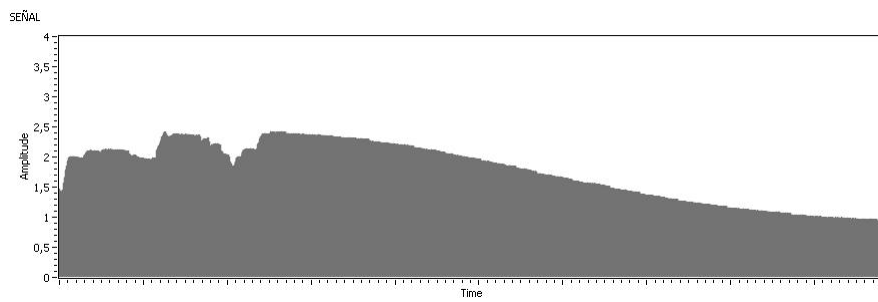
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2011/10/07 hora: 16:57:45 UT, Q=7*



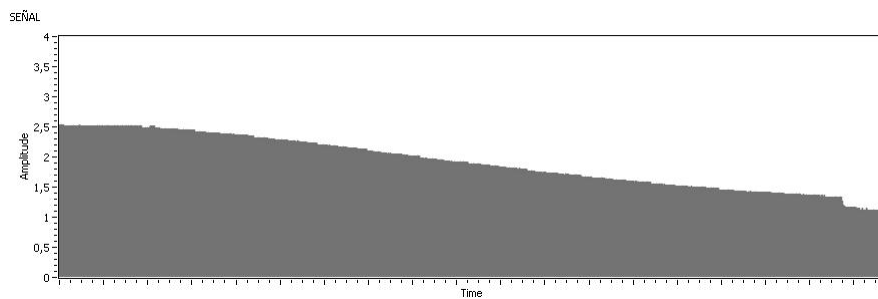
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2011/10/08 hora: 18:43:39 UT, Q=7*



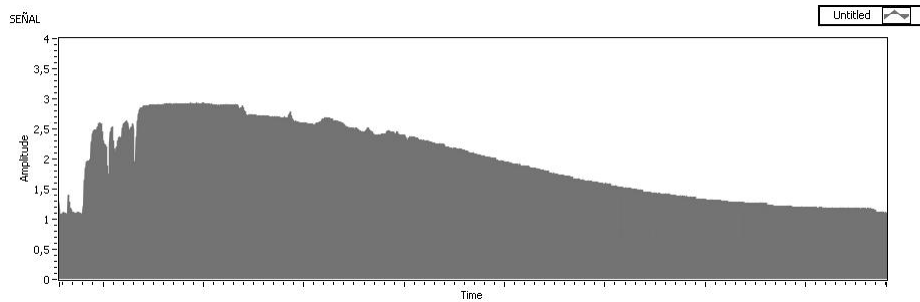
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2011/10/10 hora: 18:43:53 UT, Q=7*



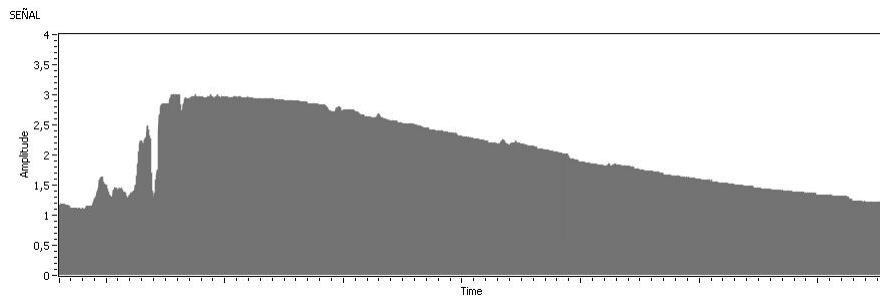
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2011/10/15 hora: 18:52:38 UT, Q=7*



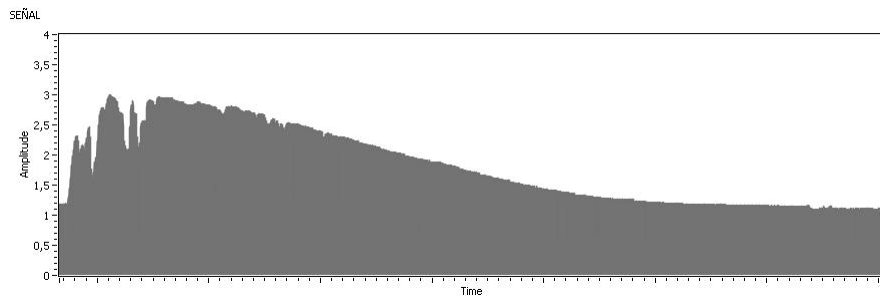
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2011/10/1 hora: 16:10:23 UT, Q=7*



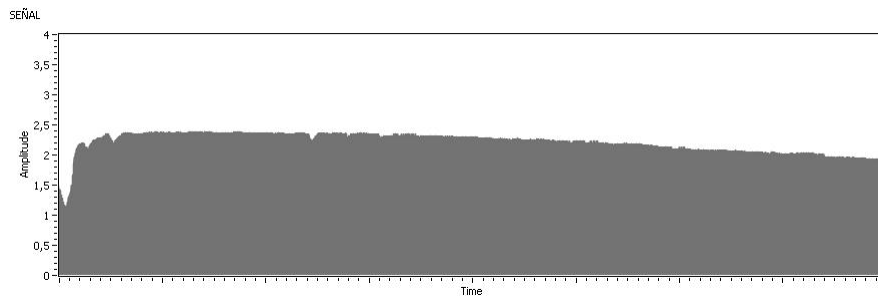
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/22 hora: 17:31:15 UT, Q=7*



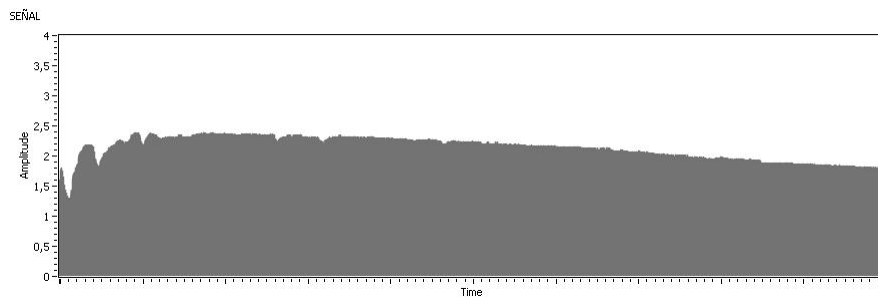
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/25 hora: 18:30:40 UT, Q=7*



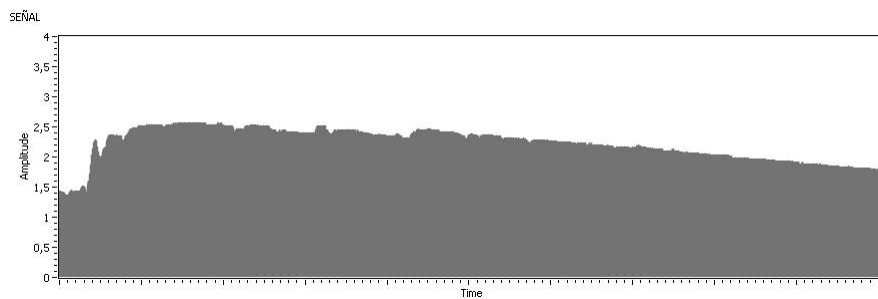
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/28 hora: 17:31:15 UT, Q=7*



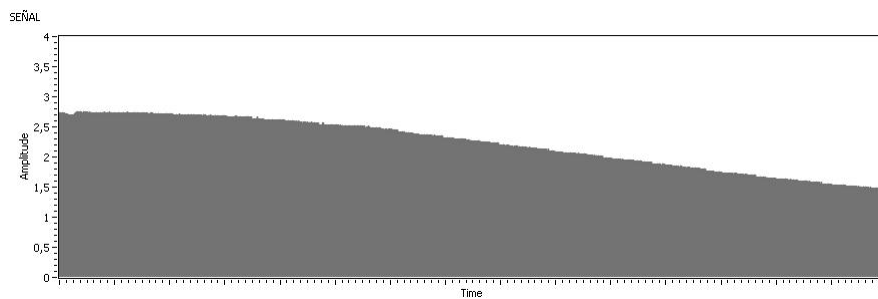
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/29 hora: 13:30:00 UT, Q=7*



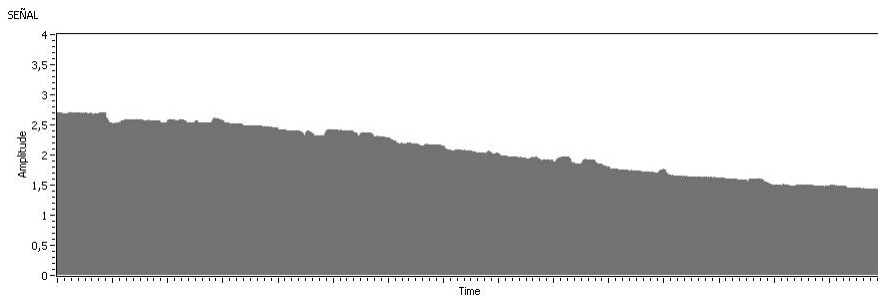
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/30 hora: 15:34:24 UT, Q=7*



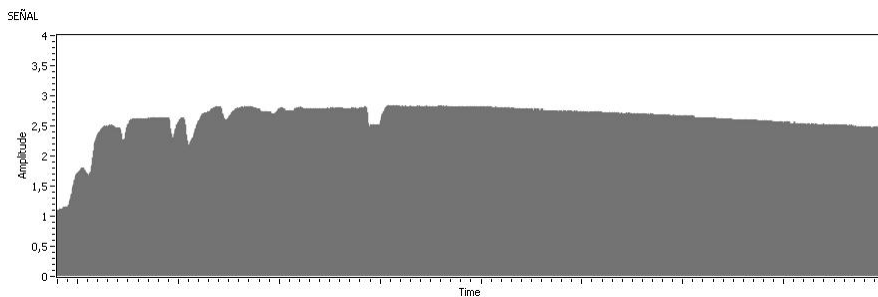
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/31 hora: 16:04:24 UT, Q=7*



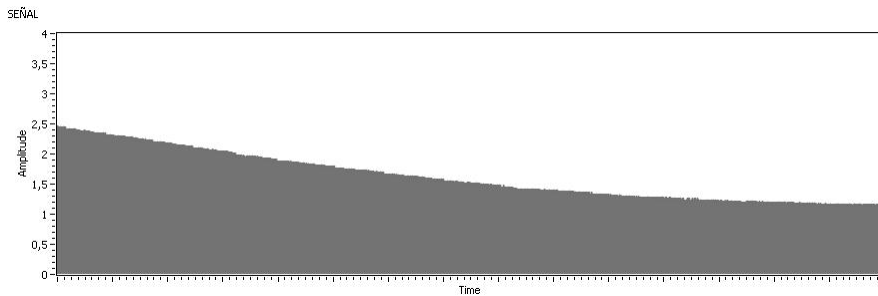
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/31 hora: 16:54:26 UT, Q=7*



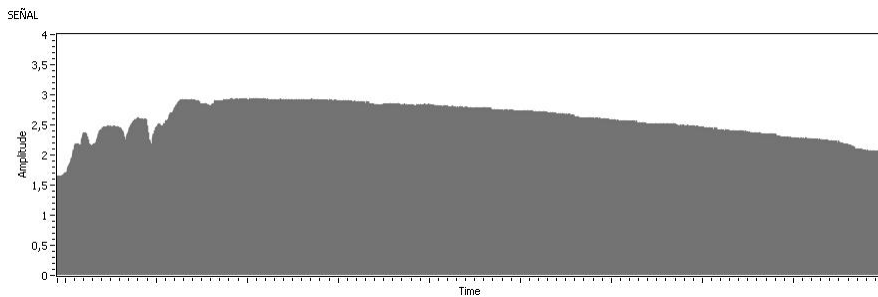
*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/31 hora: 16:24:25 UT, Q=7*



*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/31 hora: 17:09:53 UT, Q=7*



*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/31 hora: 17:19:53 UT, Q=7*



*Radio emisión solar en la frecuencia de 12 Ghz, señal registrada 2010/10/31 hora: 17:49:54 UT, Q=7*

# ANEXO I

1968ApJ...152..777S

**TABLE 1—CENTRAL SOLAR BRIGHTNESS-TEMPERATURE SUMMARY**

Wavelength	Frequency (GHz)	Central Brightness Temperature (°K)	Temperature Tolerance (°K)	Fig. & Reference	Source
4.0 μ	75000	5626	± 100	1	Murcay, Murcay, and Williams (1964)
5.0 μ	60000	5270	± 150	1	Murcay <i>et al.</i> (1964)
8.63 μ	35000	5160	± 40 (1σ)	2	Saiedy (1960)
11.1 μ	27000	5036	± 30 (1σ)	3	Saiedy and Goody (1959)
12.02 μ	25000	5050	± 80 (1σ)	2	Saiedy (1960)
1.0 mm	300.0	5900	± 500	4	Low and Davidson (1965)
1.2 mm	250.0	5600	± 400	5	Bastin <i>et al.</i> (1964)
1.3 mm	231.0	5900	± 400	5	Bastin <i>et al.</i> (1964)
1.3 mm	231.0	6000	± 500	5	Bastin <i>et al.</i> (1964)
1.8 mm	167.0	5300	± 700	6	Gorokhov, Dryagin, and Fedoseev (1962)
2.0 mm	150.0	5670	± 230 (p.e.)	7	Wert (1962)
2.15 mm	140.0	5433	± 500	8	Tolbert and Straiton (1961)
2.2 mm	136.0	6800	± 400	5	Bastin <i>et al.</i> (1964)
2.4 mm	125.0	6500	± 400	5	Bastin <i>et al.</i> (1964)
2.73 mm	110.0	5500	± 715	8	Tolbert and Straiton (1961)
2.8 mm	107.0	6800	± 500	5	Bastin <i>et al.</i> (1964)
3.0 mm	100.0	5870	± 950	8	Tolbert and Straiton (1961)
3.2 mm	94.0	6402	± 215 (1σ)	9	Simon (1965)
3.2 mm	94.0	7860	± 500	10	Tolbert, Straiton, and Walker (1962)
3.3 mm	91.0	6375	± 574	11	Rusch, Slobin, and Stelzreid (1966)
4.3 mm	70.0	7000	± 700	12	Coates (1958)
4.3 mm	70.0	9600	± 500	8	Tolbert and Straiton (1961)
4.3 mm	70.0	7100	± 200	10	Tolbert <i>et al.</i> (1962)
4.3 mm	70.0	8000	± 700	13	Kizlyakov (1961)
5.50 mm	54.5	6900	± 600 (1σ)	14	Carter, Reber, and Mitchell (1967)
5.61 mm	53.5	6750	± 600 (1σ)*		
5.62 mm	53.4	6500	± 600 (1σ)		
5.62 mm	53.4	6100	± 600		
5.62 mm	53.4	6900	± 600*		
5.74 mm	52.29	6900	± 500 (1σ)	15	Whitehurst, Copeland, and Mitchell (1957)
6.0 mm	50.0	4500	...		
6.0 mm	50.0	4500	...	15	Mitchell and Whitehurst (1958)
7.5 mm	40.0	6000	± 500	17	Whitehurst and Mitchell (1956)
7.5 mm	40.0	5700	...	16	Mitchell and Whitehurst (1958)
8.0 mm	37.5	6400	± 800	18	Salmonovich, Koshchenko, and Noskova (1959)
8.0 mm	37.5	7500	± 900	33	Salmonovich (1962)
8.5 mm	35.3	6500	...	16	Mitchell and Whitehurst (1958)
8.5 mm	35.3	6740	± 674	19	Hagen (1951)
8.6 mm	35.0	10420	± 730	20	Wulfberg and Short (1965)
8.7 mm	34.5	5280	...	21	Aarons, Barron, and Castelli (1958)
1.18 cm	25.4	8870	± 980	22	Staelin, Barret, and Kusse (1964)
1.18 cm	25.4	9800	± 700	23	Staelin <i>et al.</i> (1967)
1.26 cm	23.4	10700	± 700	23	Staelin <i>et al.</i> (1967)
1.35 cm	22.0	11000	± 700	23	Staelin <i>et al.</i> (1967)
1.43 cm	21.0	10800	± 700	23	Staelin <i>et al.</i> (1967)
1.58 cm	19.0	10800	± 700	23	Staelin <i>et al.</i> (1967)
1.6 cm	18.8	8000	...	24	Strezhneva, Plechkov, and Starodubtsev (1958)
1.76 cm	17.0	9100	± 300	25	Tsuchiya and Nagane (1965)
2.0 cm	15.0	15100	± 1057	20	Wulfberg and Short (1965)
3.16 cm	9.5	11800	± 2500	26	Veisig and Molchanov (1963)
3.2 cm	9.4	19300	± 1351 (p.e.)	27	Minnett and Labrum (1950)
3.2 cm	9.4	17000	...	24	Strezhneva <i>et al.</i> (1958)
3.2 cm	9.4	16000	...	21	Aarons <i>et al.</i> (1958)
4.6 cm	6.5	22800	± 4560	28	Higgs and Broten (1966)
9.0 cm	3.3	30000	± 3000	29	Swarup (1961)
10.0 cm	3.0	45000	...	24	Strezhneva <i>et al.</i> (1958)
10.5 cm	2.9	42000	...	30	Hey and Hughes (1956)
10.7 cm	2.8	33000	...	31	Covington <i>et al.</i> (1955)
21.0 cm	1.4	47000	...	32	Christiansen and Warburton (1955)

\* A data point not shown on plot.

© American Astronomical Society • Provided by the NASA Astrophysics Data System

<http://adsabs.harvard.edu/abs/1968ApJ...152..777S>

## ANEXO J CALIBRACIÓN DEL RADIOMETRO



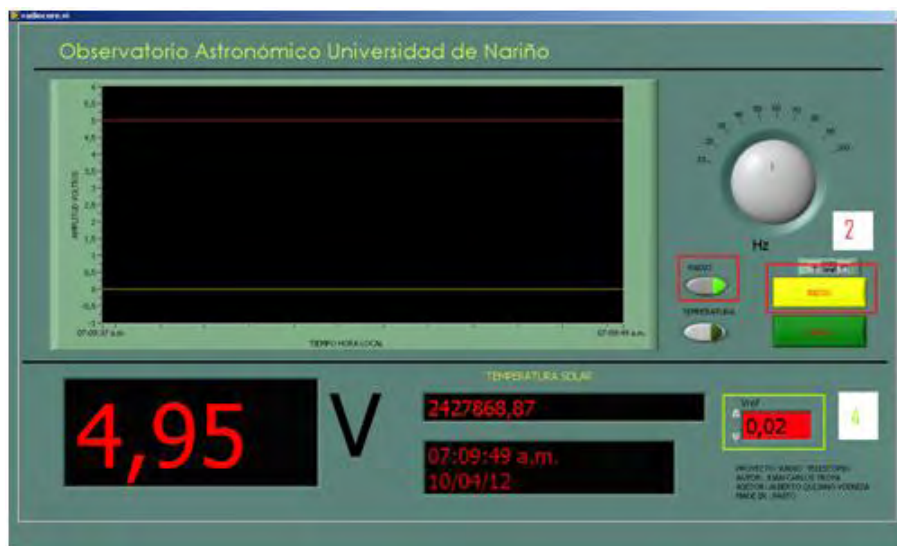
*Panel frontal del radiometro*

**OFFSET:** ajusta el nivel de ruido de la entrada.

**dB:** ganancia del buscador de satélites.

**INTEGRADOR:** ajusta el tiempo en segundos de retención de la señal.

**GANACIA:** ajusta la ganancia final del instrumento.



*Interface del programa*



Para el correcto uso y calibración del radiómetro se debe seguir en orden la siguientes instrucciones.

1. Desconecte del radiómetro la línea del sensor LNB
2. Encienda el programa del radio telescopio y digite inicio, aparecerá una señal enviada por el radiómetro.
3. Ajuste con la perilla de offset el valor mínimo del valor de la señal.
4. Apague el radiómetro y conecte la línea del sensor, apunte la antena a un lugar del cielo, o la horizonte sin influencia del sol. Por último anote el valor de voltaje que aparece en el en pantalla, en el lugar de Vref de la interface, este dato corresponderá al valor de temperatura de 300 grados kelvin. <sup>4</sup>
5. Ajuste nuevamente el offset del radiómetro, aun valor próximo a cero.
6. Apunte al sol con el buscando el mayor valor de la señal, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 3.

---

<sup>4</sup>WILLIAM P. Lonc .Radio Astronomy Projects. Pag 6-5

## ANEXO K

### RUIDO EN LOS AMPLIFICADORES

El circuito de los amplificadores son amplificadores de DC, el principal ruido integrado a estos amplificadores es el voltaje de desvío.

### VOLTAJE DE DESVÍO

El voltaje de desvío es aquel voltaje que se mide en la salida cuando en la entrada el voltaje es cero, aquel voltaje de desvío lo afectan 2 condiciones

1. el voltaje de desvío en la entrada
2. la corriente de desvío en la entrada

### VOLTAJE DE DESVÍO EN LA ENTRADA ( $V_{IO}$ )

El voltaje en la salida e lo pude calcular función de el voltaje de desvío en a través de la siguiente ecuación.

$$V_0(V_{IO}) = \frac{R_1 + R_f}{R_1} V_{IO}$$

### CORRIENTE DE DESVÍO ( $I_{IO}$ )

El voltaje en la salida es lo pude calcular función de la corriente de desvío en a través de la siguiente ecuación.

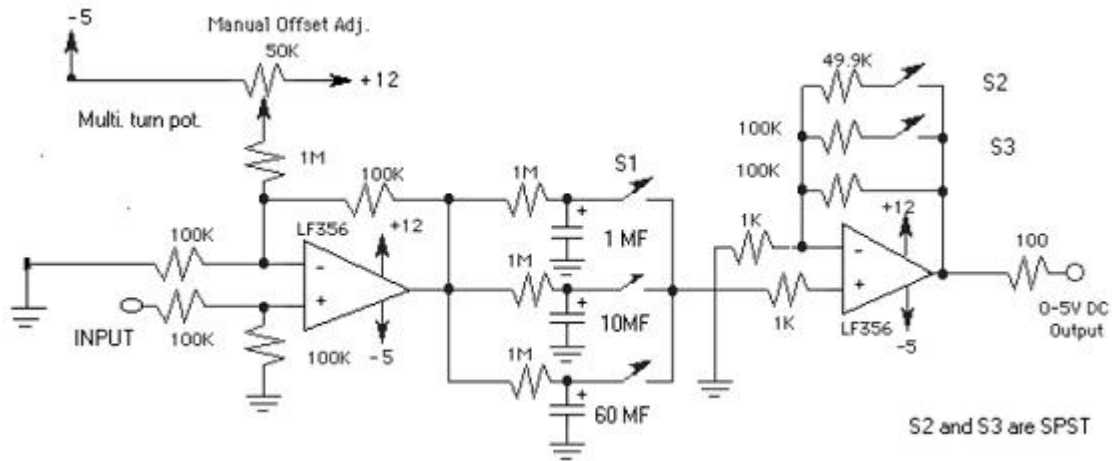
$$V_0(I_{IO}) = R_f I_{IO}$$

Para el amplificador LF356 el voltaje de desvío es 10mV máx. y la corriente de Máxima desvío es 2 nA

### VOLTAJE TOTAL DE DESVÍO

El voltaje total en la salida será entonces la contribución del voltaje generado por  $V_{IO}$  y el voltaje generado por  $I_{IO}$ .

$$V_O = V_0(V_{IO}) + V_0(I_{IO})$$



En el circuito del radio se puede mirar los amplificadores que tendrían la fuente de ruido que afectaría al voltaje final del registro de la señal. El primer amplificador ajusta el offset de la señal entrante, si al finalizar esta etapa el voltaje fuera cero, el segundo amplificador tendría un voltaje en su salida causa del voltaje total de desvío, y sería un voltaje de error para el calculo de la temperatura del la señal entrante ya que:

$$T(\text{promedio}) = \frac{\Omega_A T_2}{\Omega_f V_2} V_f$$

Donde  $V_f$  sería el voltaje entregado por el segundo amplificador; la solución a este problema es el circuito de offset el cual puede tomar valores negativos y así anular el voltaje de desvío haciendo cero la señal de salida de la segunda etapa. Si lo miramos desde el punto de vista de la temperatura la temperatura del circuito receptor sería cero, y la única influencia de error sería la del sistema formado por los cables de la entrada al receptor, la antena y el sensor.

## ANEXO L CONSTRUCCIÓN GUÍA DE ANTENA



*Base azimutal*



*Base azimutal*



*Base azimutal*



*Base azimuthal*



*Base azimuthal*



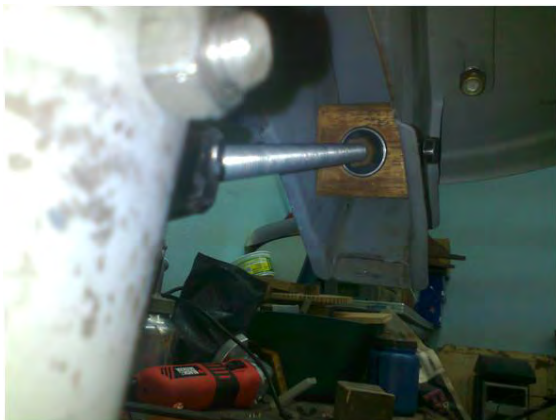
*Base azimuthal*



*Base altitud*



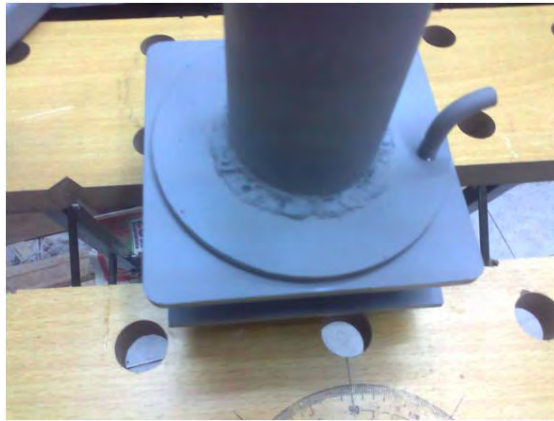
*Base altitud*



*Base altitud*



*Base altitud*



*Base altitud*



*Base altitud*



*Base altitud*



*Base altitud*



*Base altitud*





*Base altitud*



*Sistema apuntando al sol*



*Juan Carlos Troya*