

SPIDER
SMALL PARABOLIC INSTRUMENT
FOR DEMONSTRATION AND
EDUCATION OF RESEARCH

B. Vaquero Jiménez, J.M. Serna Puente,
J.A. López Fernández, F. Colomer

INFORME TÉCNICO - OAN 2010 - 18

Actualizaciones

Versión	Fecha	Actualización
1	Noviembre 2010	Primera versión
2	Junio 2012	Cambio de nombre, actualización de gráficas y plantilla para la realización de observaciones.

Índice

1.	Introducción y justificación de la adquisición.....	6
2.	Introducción a la radioastronomía (desde el punto de vista de SPIDER).....	6
2.1.	Radioastronomía	6
2.2.	Información de la Galaxia.....	7
2.3.	Observaciones radioastronómicas con SPIDER: línea del HI	8
2.4.	Curva de rotación	10
2.5.	Estructura de la Galaxia	11
3.	Descripción detallada del sistema (principio de funcionamiento, diagrama de bloques).....	12
3.1.	Especificaciones técnicas del radiotelescopio de Yebes.....	12
3.2.	Descripción del producto	12
3.3.	Función y posicionamiento	14
3.4.	Diagramas de bloques	15
4.	Proceso de instalación. Obras de adecuación del pabellón de divulgación científica...18	
4.1.	Construcción del pilar de hormigón sobre el cual se instala el radiotelescopio ...18	
4.2.	Zanja desde la posición del radiotelescopio hasta la entrada al pabellón de divulgación	19
4.3.	Instalación del Radiotelescopio SPIDER.....	21
4.4.	Instalación de la sala de control del sistema dentro del pabellón.....	27
5.	Software (QRadio, KStars, Salsa).....	28
6.	Ajustes (comunicación entre ordenador de control y radiotelescopio, puntería).....	29
6.1.	Comunicación entre el radiotelescopio SPIDER y el ordenador de control.....	29
6.2.	Conexión en remoto	32
6.3.	Puntería, ajuste fino.....	33
7.	Realización de observaciones.....	35
7.1.	Preparación de las observaciones	35
7.2.	Realización de las observaciones.....	39
7.3.	Final de las observaciones	42
7.4.	Análisis de los espectros observados.....	42
7.5.	Análisis de los datos	47
7.5.1.	Curva de rotación.....	47
7.5.2.	Mapa de la Vía Láctea.....	48
8.	Conclusión.....	50

9. Referencias	51
10. Anexo.....	51

Figuras

Figura 1: Curva de rotación de diferentes sistemas.....	7
Figura 2: Representación artística de la Vía Láctea.	8
Figura 3: Situación del Sol en la Vía Láctea, C indica el centro galáctico.....	8
Figura 4: Formación de la línea de 21cm del hidrógeno atómico.....	9
Figura 5: Efecto Doppler.	9
Figura 6: Situación geométrica cuando observamos la nube M a la longitud galáctica l . La nube y el Sol, S , se mueven en órbitas circulares con la misma velocidad. C es el centro galáctico.....	10
Figura 7: Posibles situaciones de la nube cuando observamos en los cuadrantes I y IV.	11
Figura 8: Partes principales del radiotelescopio.....	13
Figura 9: Pilar de soporte del radiotelescopio.	19
Figura 10: Zanja para los cables de alimentación, control y señal de RF.	20
Figura 11: Partes constituyentes de SPIDER en el emplazamiento de la instalación.....	21
Figura 12: Fijación del pedestal del radiotelescopio (junto con el rack de alimentación, control y recepción) al pilar de sujeción en el terreno.	21
Figura 13: Instalación de la estructura que permite izar los motores de azimut y elevación.	22
Figura 14: Sistema preparado para efectuar el montaje de los motores.	22
Figura 15: Elevación del motor de azimut.	23
Figura 16: Instalación del motor de elevación.	23
Figura 17: Cableado de control de los motores.....	24
Figura 18: Proceso de instalación de la superficie reflectora (parábola) y tetrapodo con la bocina listo para su integración en el sistema.....	25
Figura 19: Receptor instalado dentro del rack en el pedestal del radiotelescopio.	26
Figura 20: Radiotelescopio divulgativo SPIDER instalado con el 40 metros al fondo.	26
Figura 21: Control de SPIDER en el interior del pabellón de divulgación.....	27
Figura 22: Esquema eléctrico del módem.....	29
Figura 23: Integración del módem en el sistema.	30
Figura 24: Módem en el extremo de Spider dentro del rack del receptor.	31
Figura 25: Entrada/salida de datos desde el rack del receptor.	31
Figura 26: Módem en el extremo del PC de control.	32
Figura 27: Programa VNC Viewer.....	33

Figura 28: Corrección de la puntería.....	33
Figura 29: Editor de QRadio, para modificar los parámetros del archivo de configuración.	34
Figura 30: Datos del archivo de configuración que se muestran cuando se abre QRadio. ...	35
Figura 31: Pantalla de inicio de QRadio.	36
Figura 32: Pantalla de inicio de KStars.	36
Figura 33: Conexión de KStars con QRadio.	37
Figura 34: Búsqueda de objetos con el KStars.....	38
Figura 35: Puntería y seguimiento de objetos con el KStars.....	38
Figura 36: Seguimiento del Sol desde QRadio y KStars.	39
Figura 37: Espectros con diferente tiempo de integración (10s y 60s respectivamente). ...	40
Figura 38: Ajuste los ejes de la gráfica del espectro.....	41
Figura 39: Espectro obtenido.	41
Figura 40: Visualización del espectro con el programa SalsaJ.	42
Figura 41: Escala de los ejes de la gráfica.	43
Figura 42: Imagen del espectro sin corregir.....	43
Figura 43: Ajuste de los ejes de coordenadas.....	43
Figura 44: Espectro con los ejes ajustados.	44
Figura 45: Selección de intervalos para la eliminación de la línea de base correspondientes con la gráfica anterior.....	44
Figura 46: Línea de base en rojo y cero en azul.....	45
Figura 47: Espectro corregido.	45
Figura 48: Velocidad de la primera componente, $x = -30,69$	46
Figura 49: Ejemplo de curva de rotación y tabla de datos obtenidos con Excel.....	48
Figura 50: Relación entre coordenadas galácticas (r, l) y cartesianas (x, y)	49
Figura 51: Ejemplo de estructura de la Galaxia y tabla de datos obtenidos con Excel.....	50

1. Introducción y justificación de la adquisición

SPIDER (Small Parabolic Instrument for Demonstration and Education of Research) es un radiotelescopio de 2,3m de diámetro construido por la compañía sueca Are Elektronik [3] siguiendo los principios del instrumento SALSA (Such A Lovely Small Antenna) desarrollado por Onsala Space Observatory (Suecia). El objetivo principal del sistema es introducir a estudiantes y profesores en el mundo de la radioastronomía, dándoles la oportunidad de manejar un radiotelescopio real, tratando posteriormente los datos para obtener la estructura de la Vía Láctea, etc.

El radiotelescopio está equipado con un receptor de banda L (longitud de onda de 21cm–1420MHz) y un espectrógrafo (correlador de 352 canales con un ancho de banda total de 2,4MHz). El ancho del haz es de 7 grados. En el foco de la antena existe un amplificador de bajo ruido. Para llevar la señal a la cabina que contiene el receptor, las fuentes de alimentación y el modem, se utiliza un cable coaxial. En el vertex de la antena hay instalada una pequeña antena dipolo y un diodo de ruido para la calibración.

La sensibilidad del receptor hace posible una detección rápida de la emisión en radio debida a la línea espectral del hidrógeno atómico, HI, a la longitud de onda de 21cm y realizar un mapa de la distribución a gran escala del HI en nuestra Galaxia, la Vía Láctea, obteniendo la situación de los brazos espirales que la forman. El software QRadio de Onsala se utiliza para controlar el radiotelescopio, este software puede comunicarse con el programa KStars.

Las observaciones se pueden realizar remotamente a través de internet. Después de la observación los datos se pueden descargar para trabajar con ellos.

Muchas de las aplicaciones están en proceso de diseño, en coordinación con otros observatorios de la EVN que forman parte de la red de Centros de Visitas (VC-Net) patrocinado por el proyecto EC FP7 “RadioNet”.

Este informe técnico además de mostrar la parte técnica y el proceso de instalación del radiotelescopio SPIDER, pretende ser divulgativo, proporcionando una pequeña introducción a la radioastronomía desde el punto de vista de SPIDER y una explicación detallada de cómo hacer observaciones y tratar los datos para obtener la estructura de nuestra Galaxia.

2. Introducción a la radioastronomía (desde el punto de vista de SPIDER)

2.1. Radioastronomía

La radioastronomía es la rama de la astronomía que observa los objetos celestes midiendo su emisión de **radiación electromagnética** en la región radio del espectro. Las **ondas radio** tienen una longitud de onda que va desde metros hasta fracción de milímetro (mayor que la de la luz visible). La atmósfera terrestre es transparente a este tipo de radiación por lo que se pueden hacer observaciones desde la superficie de la Tierra y

durante las 24 horas del día. Además las ondas de radio no son atenuadas por el polvo interestelar permitiendo la observación de objetos que son invisibles en el óptico.

La primera detección astronómica a longitudes de onda radio fue realizada por Karl G. Jansky en 1931. En 1935, se identificó esta emisión como proveniente del centro de la Galaxia.

La radioastronomía ha permitido la identificación de nuevos objetos como púlsares, cuántares, galaxias activas así como la radiación de fondo de microondas, materia y energía oscura, etc.

2.2. Información de la Galaxia

La Vía Láctea es una galaxia espiral consistente en cientos de millones de estrellas y grandes cantidades de gas y polvo. La Tierra y el Sol están situados en uno de los brazos espirales que la forman, aproximadamente a 25000 años luz (8kpc) del centro galáctico.

Desde la Tierra vemos la Galaxia como una banda estrecha que cruza el cielo, pero su forma es más compleja. Además algunas regiones están más oscuras que otras ya que la luz visible de las estrellas es absorbida por el polvo interestelar. Como no podemos salir de la Galaxia para observarla, tenemos que hacerlo desde nuestra situación en el Sistema Solar y de una forma indirecta. Aunque las observaciones a otras galaxias nos pueden dar una idea de la posible estructura de la nuestra. Gracias a los estudios realizados, los astrónomos han concluido que nuestra Galaxia parece un fino disco de estrellas y gas, los cuales están distribuidos con un patrón espiral y rotan alrededor del centro galáctico.

La radioastronomía puede demostrar la existencia de las partes que no vemos, ya que no está afectada por el polvo interestelar. Con SPIDER podemos confirmar la **estructura espiral** de la Galaxia, observando los diferentes brazos que la forman, además de obtener su **curva de rotación** que muestra la velocidad circular en función de la distancia al centro de la Galaxia. Al contrario que en otros sistemas, muchas galaxias exhiben curvas de rotación planas, $V_{Galaxia}(R)=constante$, la velocidad lineal o circular no depende de la distancia R al centro. En el Sistema Solar a medida que nos alejamos del centro la velocidad disminuye. Este fenómeno demuestra de forma indirecta la existencia de **materia oscura** en las galaxias, materia que no vemos, pero se deduce que existe por los efectos que produce.

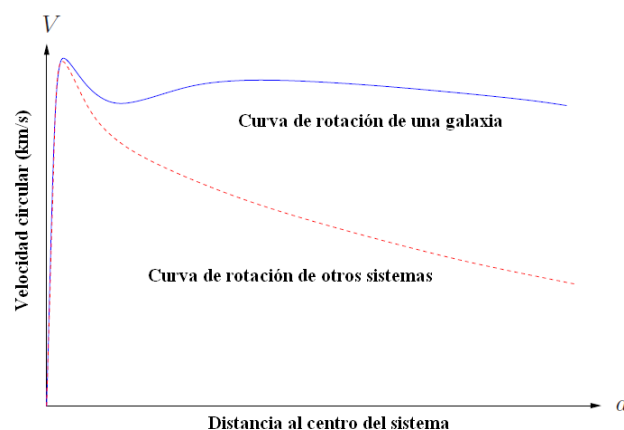


Figura 1: Curva de rotación de diferentes sistemas.



Figura 2: Representación artística de la Vía Láctea.

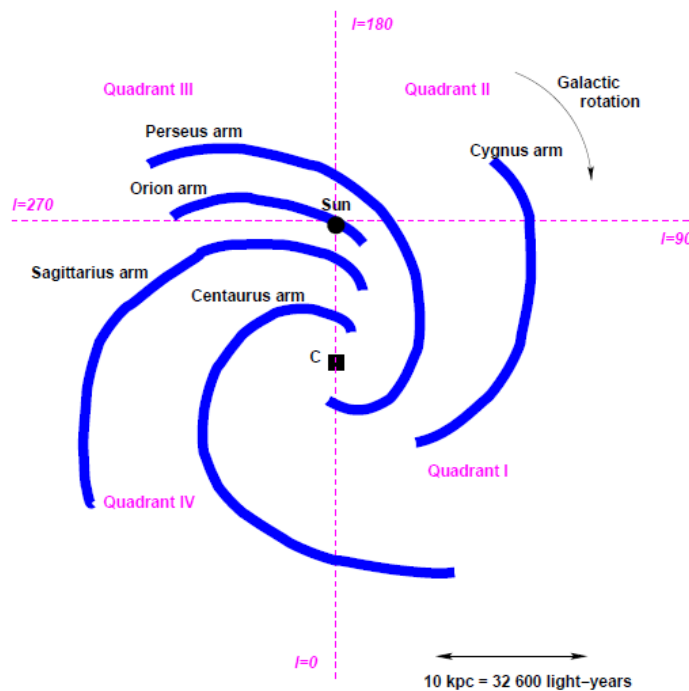


Figura 3: Situación del Sol en la Vía Láctea, C indica el centro galáctico.

2.3. Observaciones radioastronómicas con SPIDER: línea del HI

La mayoría del gas en nuestra Galaxia es hidrógeno atómico, **HI**. Átomo formado únicamente por un protón y un electrón. El hidrógeno atómico emite una línea en radio a la longitud de onda de $\lambda = 21\text{cm}$ o a una frecuencia de $f = c/\lambda = 1420\text{MHz}$ (donde c es la velocidad de la luz). Ésta es la señal que queremos y podemos detectar con nuestro radiotelescopio.

Esta señal espectral se produce cuando el spin del electrón pasa de ser paralelo al spin del protón a ser antiparalelo, llevando al átomo a un estado de energía más bajo. Este cambio ocurre una vez cada 10 millones de años, pero la gran cantidad de hidrógeno de nuestra Galaxia hace que sea posible detectarlo de forma sencilla.

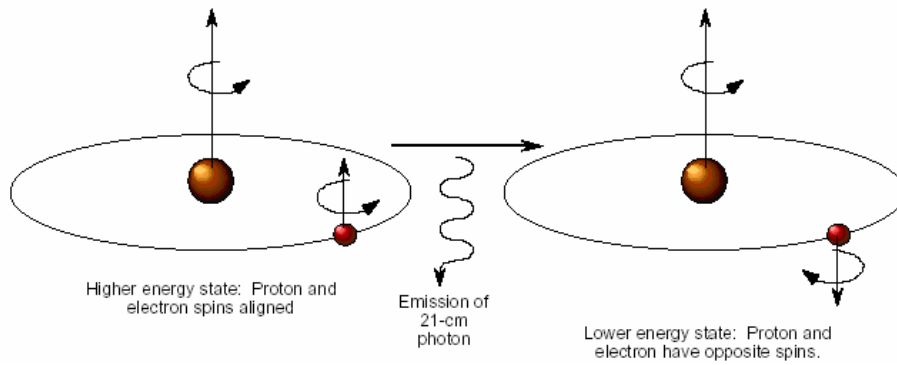


Figura 4: Formación de la línea de 21cm del hidrógeno atómico.

Observando la emisión del HI, podemos conocer el movimiento de las nubes de gas de nuestra Galaxia. Gracias al **efecto Doppler** podemos relacionar la frecuencia observada de la señal con la velocidad del gas emisor.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{v}{c}$$

Donde:

f	Frecuencia observada
f_0	Frecuencia emitida por la línea que estamos observando
$\Delta f = f - f_0$	Diferencia de frecuencias
v	Velocidad: > 0 desplazamiento al rojo (el objeto se aleja) < 0 desplazamiento al azul (si se acerca)

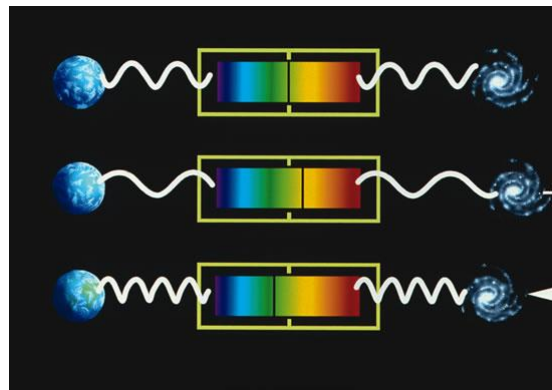


Figura 5: Efecto Doppler.

Al observar la línea de 21cm del HI a lo largo de la longitud galáctica, sintonizamos el receptor del radiotelescopio a una banda de frecuencia cercana a la frecuencia exacta de la línea del HI. Esto nos permite encontrar HI gas con diferentes velocidades que emite a la frecuencia de 1420MHz, aunque la frecuencia (o velocidad), esté desplazada al rojo o al azul cuando nosotros la detectamos, dependiendo de si la nube de gas que observamos se está alejando o acercando de nuestra posición.

La existencia de esta línea fue predicha en 1944 por Van de Hults y observada por primera vez en 1951 por Ewen y Purcell, Muller y Oort.

2.4. Curva de rotación

Cuando realizamos observaciones de la Galaxia, a lo largo de la línea de visión podemos encontrar diferentes nubes de gas, cada una perteneciente a una zona de la Galaxia y moviéndose a velocidades diferentes. Esto se traduce en que en un espectro observamos varias componentes o varios picos. La componente con la mayor velocidad, $V_{r,max}$, viene de la nube que está en el punto tangencial, T , donde observamos el vector velocidad completo a lo largo de la línea de visión.

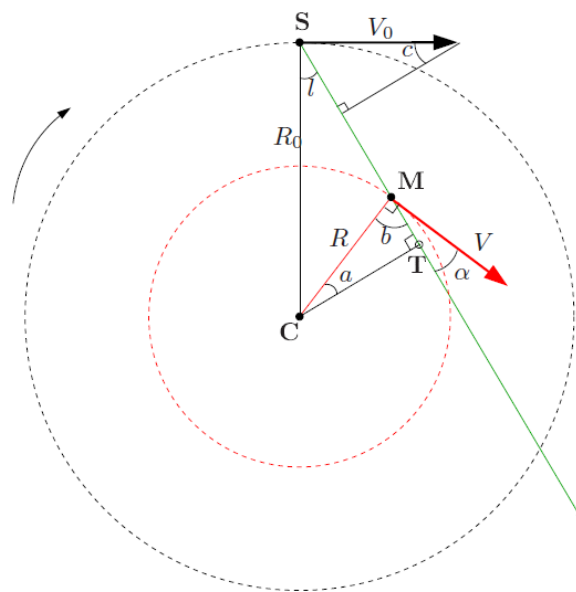


Figura 6: Situación geométrica cuando observamos la nube M a la longitud galáctica l . La nube y el Sol, S , se mueven en órbitas circulares con la misma velocidad. C es el centro galáctico.

En este punto se cumple [1]:

$$R = R_0 \text{sen} l$$

$$V = V_{r,max} + V_0 \text{sen} l$$

Donde:

R_0	Distancia del Sol al centro galáctico, 8,5kpc
V_0	Velocidad de rotación del Sol alrededor de la Galaxia, 220km/s
R	Distancia de la nube al centro de la Galaxia
V	Velocidad de la nube de gas
r	Distancia de la nube de gas al Sol
l	Longitud galáctica

Observando a diferentes longitudes galácticas, l , siempre dentro del primer cuadrante (en otros cuadrantes no tenemos puntos tangenciales, Figura 3), obtenemos diferentes valores

de $V_{r,max}$, calculando R y V podemos representar la curva de rotación $V(R)$, tal y como podremos ver en la Figura 49.

2.5. Estructura de la Galaxia

Para determinar la estructura de la Galaxia necesitamos todas las componentes de la velocidad, V_r , que observamos en cada uno de los espectros. Suponiendo que el gas en nuestra Galaxia obedece la rotación diferencial, es decir, que la velocidad circular es constante e igual a la del Sol, $V(R) = constante = V_0$, obtenemos la siguiente relación [1]:

$$V_r = V_0 \text{sen} l \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right)$$

$$R = \frac{R_0 V_0 \text{sen} l}{V_0 \text{sen} l + V_r}$$

Para cada medida de velocidad radial, V_r , podemos calcular la distancia de la nube al centro de la Galaxia, R , sabiendo en qué dirección estamos observando, l .

Es importante darse cuenta que cuando observamos en los cuadrantes I y IV puede haber dos posibles localizaciones de la nube correspondientes con los valores de l y R .

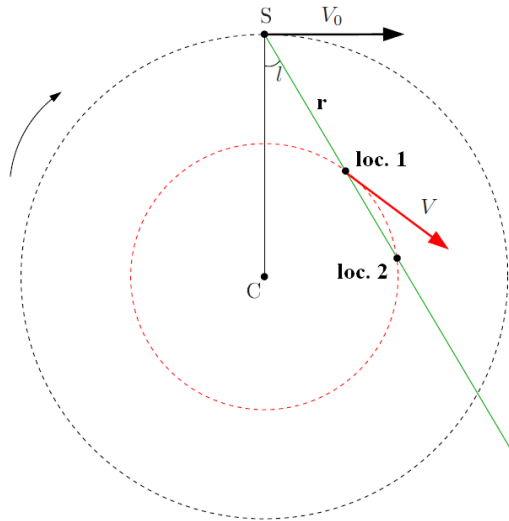


Figura 7: Posibles situaciones de la nube cuando observamos en los cuadrantes I y IV.

Sin embargo, cuando observamos los cuadrantes II y III, la posición de la nube está determinada de forma única.

Para poder solucionar este problema utilizamos la siguiente relación matemática, donde r es la distancia de la nube al Sol [1]:

$$r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \text{sen}^2 l} + R_0 \text{cos} l$$

Se trata de una ecuación de segundo orden con dos posibles soluciones, r_{\pm} . Los valores negativos de r deben ser descartados ya que no tienen sentido físico. Cuando estemos en los cuadrantes II y III sólo va a haber una solución positiva, correspondiente con la posición de la nube de gas. En los otros cuadrantes puede haber dos soluciones positivas. Cuando tenemos dos resultados positivos no sabemos cuál es el verdadero a no ser que hagamos observaciones a diferentes latitudes galácticas, b , que no va a ser nuestro caso, ya que al observar fuera del plano galáctico, $b = 0$, no somos capaces de ver algunas de las nubes de hidrógeno.

3. Descripción detallada del sistema (principio de funcionamiento, diagrama de bloques)

3.1. Especificaciones técnicas del radiotelescopio de Yebes

Diámetro	2,3m
Resolución angular	7 grados a 1420MHz (7 grados son aproximadamente el ancho de las manos con los brazos extendidos)
Correlador o back-end	Ancho de banda de 2,4MHz y 256 canales de frecuencia, cada canal tiene un ancho de 9,375kHz
Control	Posibilidad de usarlo en remoto
Modelo	OSO2.3m-2.0 "Hazel"
Consumo eléctrico	250 VAC 50 Hz, 0,5A
Fusibles	5 x T5A/250V
Clase IP	IP20
Peso	197 kg

3.2. Descripción del producto

El telescopio, o antena, consiste en un pedestal con un motor para el movimiento horizontal montado sobre él. Encima de este motor hay otro para el movimiento vertical y que sostiene la **parábola** de 2,3m. El **tetrapodo** mantiene la **bocina** en el foco de la parábola. El **rack eléctrico** está montado sobre el pedestal. Contiene la fuente de alimentación de la parte electrónica y separada, la fuente de alimentación de los motores. Además la caja del receptor, que contiene al receptor con un amplificador y una combinación de filtro y amplificador montados en la tapa.

En el radiotelescopio tenemos un **preamplificador de bajo ruido** montado en el foco de la antena y un cable coaxial que lleva la señal a la caja que contiene al receptor, las fuentes de alimentación y el modem. La conexión con el ordenador de control se realiza mediante el protocolo RS-485. El puerto serie del ordenador se usa para esta comunicación.

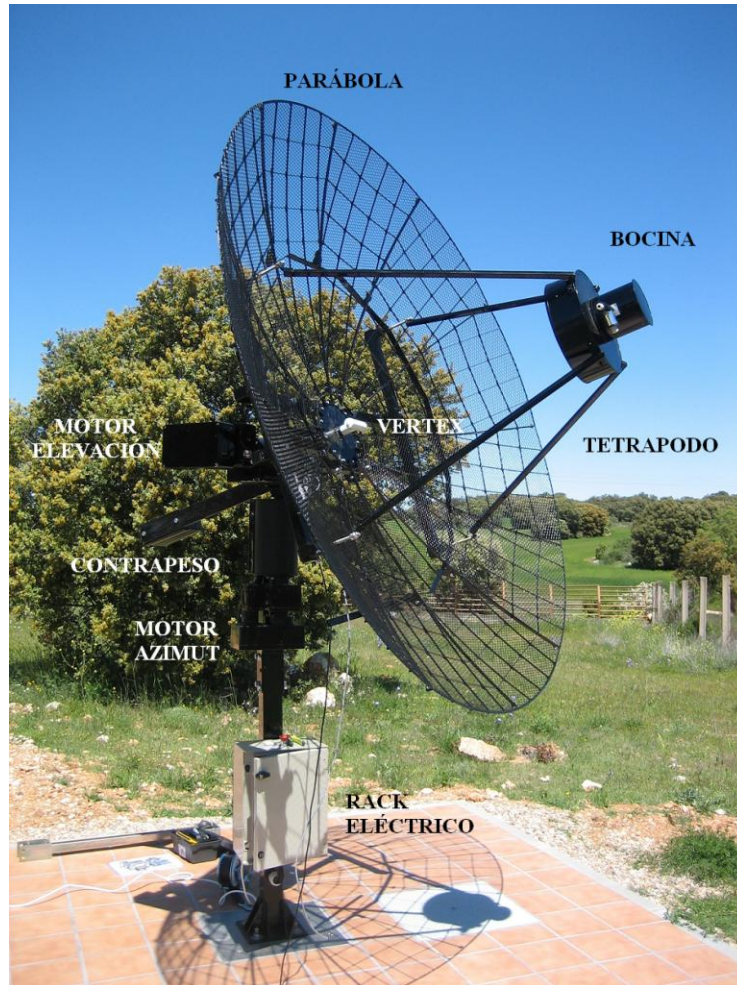


Figura 8: Partes principales del radiotelescopio.

La tarjeta del receptor contiene los circuitos integrados que controlan la antena. En el vertex del radiotelescopio hay situada una pequeña **antena dipolo** y un **diodo** para transmitir el ruido de calibración.

Como ya hemos mencionado, la antena posee dos **motores**, uno realiza el movimiento en **azimut** (horizontal) y otro en **elevación** (vertical). Puede moverse de 0 a 360 grados horizontalmente y de 0 a 90 grados verticalmente. En cada uno de los ejes existe un sistema de adquisición de la posición en cada momento (incremental decoder). Esto implica que la antena, antes de su uso, tiene que ser reseteada (stow position). Varios limitadores restringen el movimiento de la antena.

En la tapa del receptor hay **dos amplificadores**, uno de los cuales también sirve como pre filtro. En la placa la señal de 1420MHz se convierte a banda base en la etapa mezcladora, después de la cual es reducida a un ancho de banda de 2,4MHz. Un segundo mezclador junto con un procesado digital se efectúa en dos FPGA's. El **microcontrolador** recoge los datos de la unidad de procesamiento de la señal, controla los motores de la antena y se comunica con el **ordenador de control**.

El control de seguridad se realiza mediante un dispositivo de desconexión en la montura de la antena, un **stop de emergencia** en la parte alta de la caja del receptor y un **freno de**

seguridad en la parábola. El primero desconecta totalmente la alimentación del sistema al ser pulsado y tiene que ser corregido manualmente para que la antena vuelva al estado normal. Si algo bloquea el movimiento hacia abajo de la parábola de la antena, el freno de seguridad accionará un interruptor que desconecta la alimentación de los motores. Si la parábola está bloqueada, los motores estarán desconectados. Cuando el bloqueo sea eliminado se puede volver a controlar normalmente desde el ordenador. No continúa automáticamente. Además, el microcontrolador detecta cuándo el disco ha estado bloqueado más de un tiempo determinado y guarda esa información en un archivo de configuración.

Detrás del rack hay un dispositivo de desconexión que conecta la potencia de entrada y, cercano a este dispositivo, hay una caja en la que se conecta un cable de cuatro hilos (cable que va hasta el modem al lado del ordenador de control).

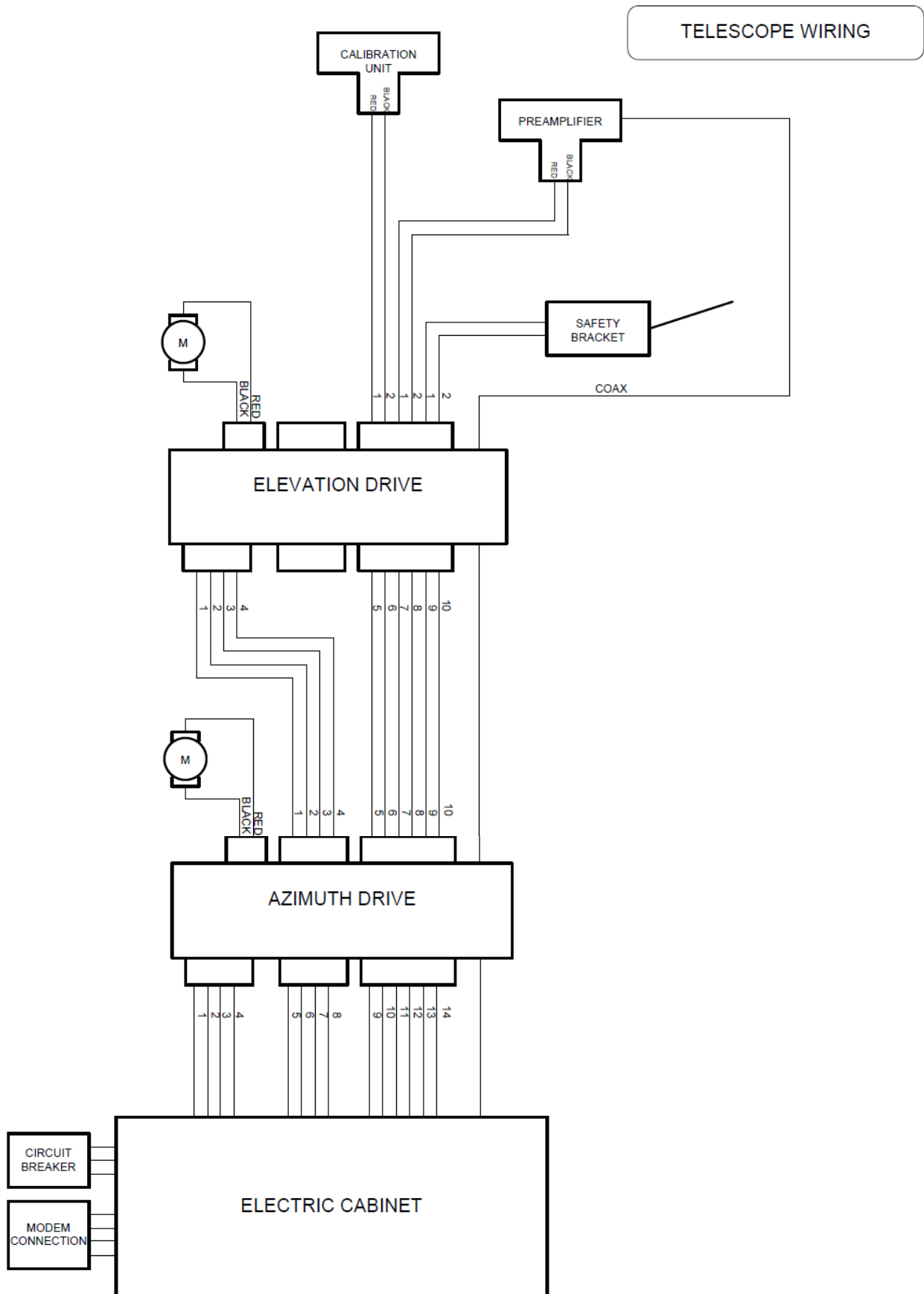
3.3. Función y posicionamiento

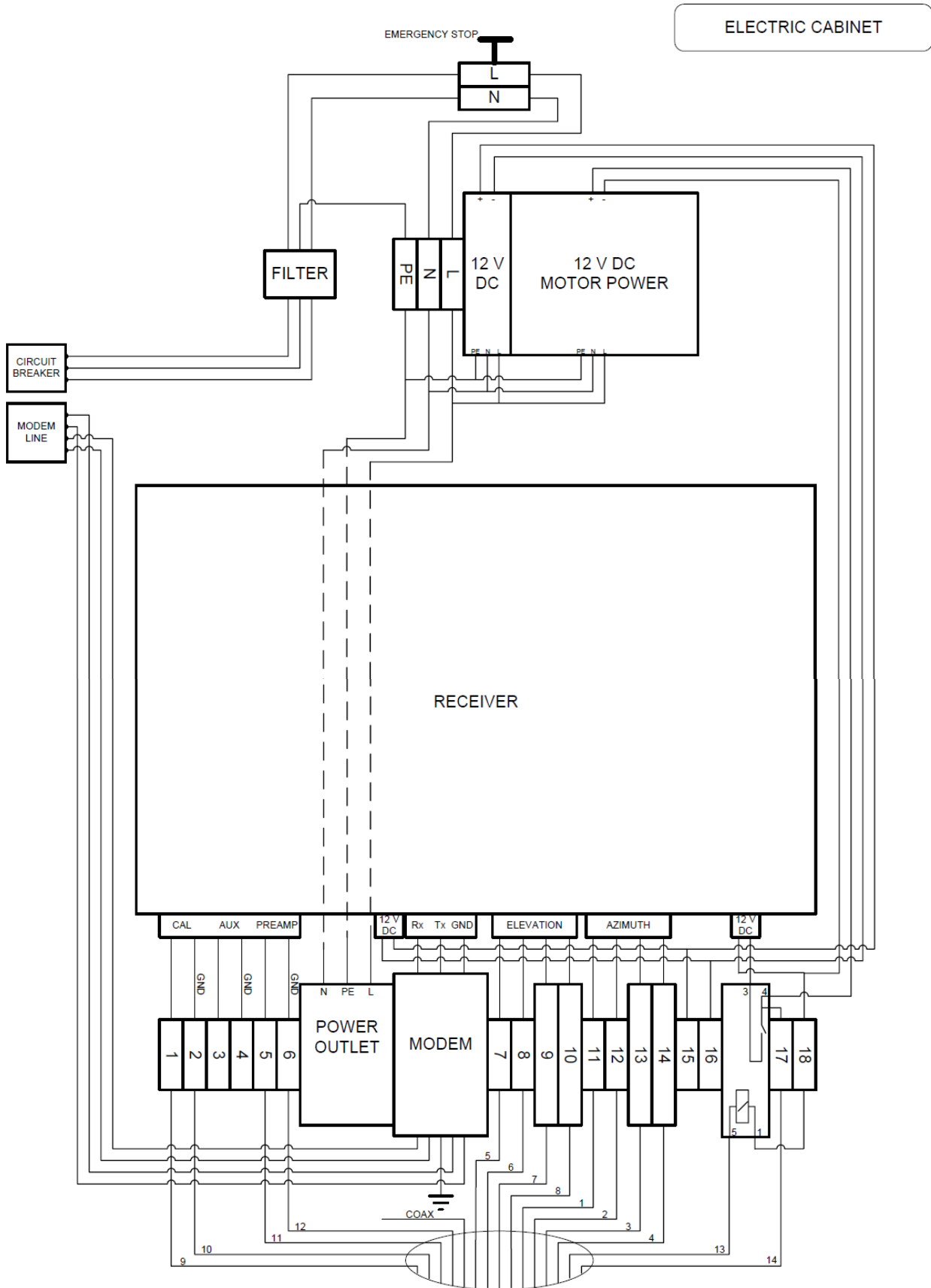
Las ondas de RF (radio frecuencias) llegan al disco desde el cielo y son concentradas en la bocina donde una sonda recoge la señal. Entonces la señal es amplificada y las señales no deseadas provenientes del entorno son filtradas y eliminadas. El centro de la banda es 1420MHz y el ancho de banda de 20MHz. En el receptor, una pequeña parte de esta banda es convertida a una banda entre 0 y 2,4MHz antes de que sea digitalizada. La segunda etapa del receptor y del correlador de 352 canales es implementada digitalmente. El correlador hace parte del procesamiento de la señal, el resto es realizado por el ordenador. Un microcontrolador recoge los datos del correlador y los envía al ordenador. El microcontrolador también dirige los motores y dirige o apunta la antena hacia la posición indicada desde el ordenador.

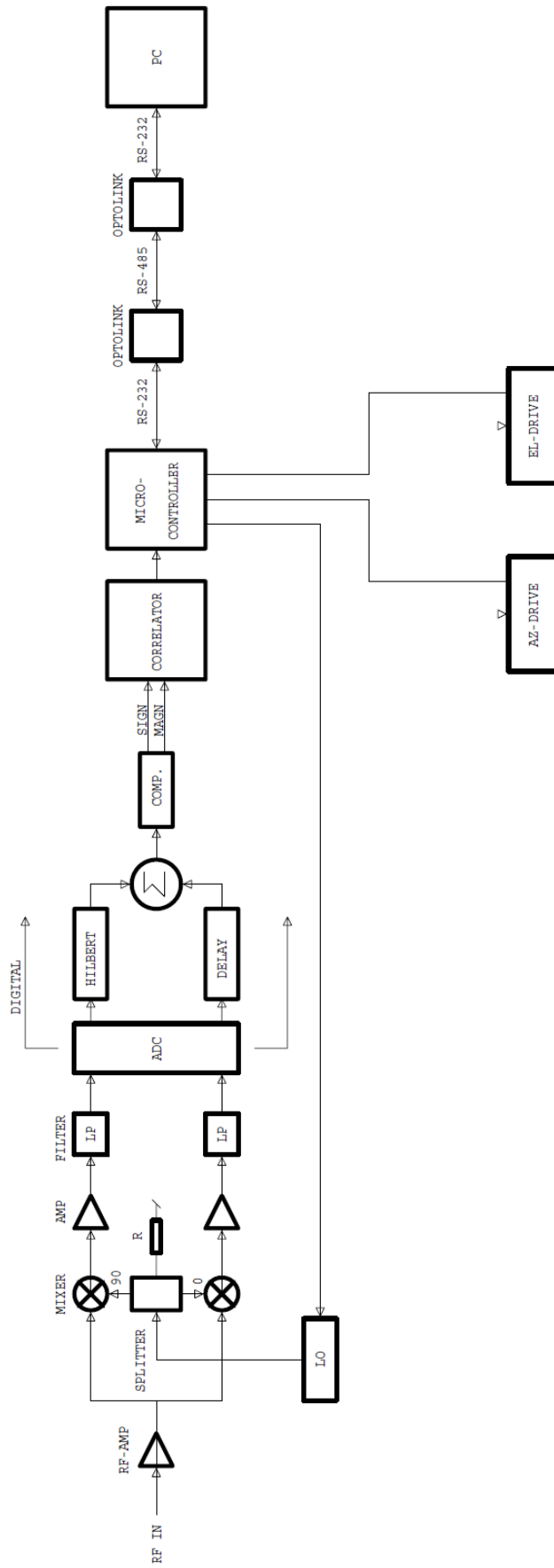
La orden de posicionamiento viene desde el ordenador y el microcontrolador compara la nueva posición con la lectura presente en el encoder, los motores empiezan a mover la parábola para disminuir la diferencia. Cuando la diferencia es cero para alguna de las direcciones ese motor se para. El motor no se mueve de nuevo hasta que la diferencia es mayor que la resolución almacenada en el archivo de configuración.

Cuando se desconecta la antena la posición se pierde. Cuando se pone en marcha es necesario resetear desde el programa de control del radiotelescopio, QRadio (botón *Reset*). La antena se mueve en el sentido contrario a las agujas del reloj y hacia abajo y cuando alcanza el limitador, los encoders se ponen a cero.

3.4. Diagramas de bloques







LAB RECEIVER

4. Proceso de instalación. Obras de adecuación del pabellón de divulgación científica

En este apartado se realiza la descripción del proceso de instalación del radiotelescopio y la adecuación del pabellón de divulgación científica del Centro de Desarrollos Tecnológicos de Yebes para albergar el ordenador de control del sistema.

Las obras han consistido en la realización de las siguientes tareas fundamentales:

4.1. Construcción del pilar de hormigón sobre el cual se instala el radiotelescopio





Figura 9: Pilar de soporte del radiotelescopio.

4.2. Zanja desde la posición del radiotelescopio hasta la entrada al pabellón de divulgación





Figura 10: Zanja para los cables de alimentación, control y señal de RF.

4.3. Instalación del Radiotelescopio SPIDER



Figura 11: Partes constituyentes de SPIDER en el emplazamiento de la instalación.



Figura 12: Fijación del pedestal del radiotelescopio (junto con el rack de alimentación, control y recepción) al pilar de sujeción en el terreno.



Figura 13: Instalación de la estructura que permite izar los motores de azimut y elevación.



Figura 14: Sistema preparado para efectuar el montaje de los motores.



Figura 15: Elevación del motor de azimut.



Figura 16: Instalación del motor de elevación.

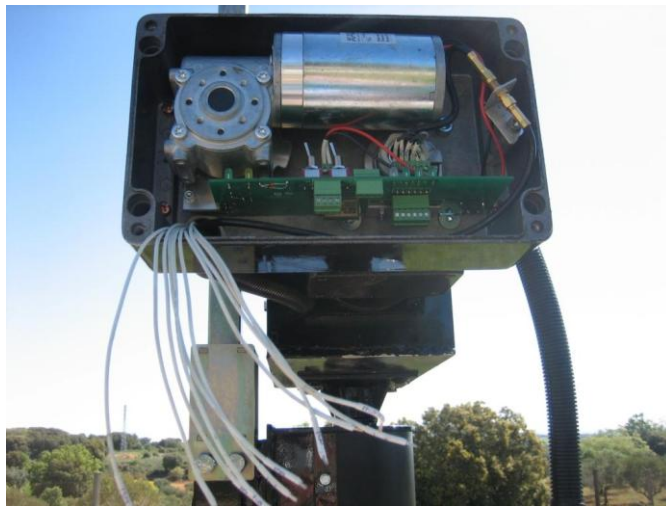


Figura 17: Cableado de control de los motores.



Figura 18: Proceso de instalación de la superficie reflectora (parábola) y tetrapodo con la bocina listo para su integración en el sistema.



Figura 19: Receptor instalado dentro del rack en el pedestal del radiotelescopio.



Figura 20: Radiotelescopio divulgativo SPIDER instalado con el 40 metros al fondo.

4.4. Instalación de la sala de control del sistema dentro del pabellón



Figura 21: Control de SPIDER en el interior del pabellón de divulgación.

5. Software (QRadio, KStars, SalsaJ)

Sistema operativo

Linux Ubuntu.

QRadio

El software QRadio, desarrollado por el Observatorio Espacial de Onsala, se utiliza para el control del radiotelescopio y la realización de observaciones. El telescopio apunta a la posición deseada en el cielo tras introducir las coordenadas en el campo adecuado de QRadio y pulsando *Track*. El telescopio entonces se mueve a la posición y la sigue. Después de introducir los correspondientes ajustes se puede obtener un espectro y guardarlo para su posterior análisis

Puede realizar tres tipos de observaciones:

- Señal: observa a la frecuencia de 1420MHz
- Referencia: observa a la frecuencia de calibración de 1418,4MHz
- "Switched": observa conjuntamente a las dos frecuencias (conmutación en frecuencia)

KStars

KStars es un programa de astronomía que funciona en Linux. Muestra un mapa del cielo con una gran variedad de objetos celestes. Es posible ver el contorno de la Vía Láctea y simplemente pinchando sobre una posición, enviar las coordenadas a QRadio, ya que los dos programas se comunican. La conexión de KStars con QRadio se hace vía servidor INDI (ver 7.1. Preparación de las observaciones).

El programa debe estar configurado para cada localización del radiotelescopio (en nuestro caso, el observatorio de Yebes), para que muestre el cielo que es visible en ese momento en el lugar donde nos encontramos y pueda hacer transformaciones de coordenadas de forma correcta. Si se cambia la localización del telescopio hay que hacer cambios en la configuración del KStars.

SalsaJ (Such A Lovely Software for Astronomy)

Se trata de un software desarrollado por EUHOU (Europe Hands-On Universe). Analiza las observaciones procedentes de telescopios y webcams. Tiene un sencillo manejo y se encuentra disponible en varios idiomas. Trabaja en Mac, Windows y Linux. Se puede descargar gratuitamente desde www.euhou.net (versión 1.4, Febrero 2010). Tiene muchas aplicaciones aunque nosotros, en principio, sólo lo utilizaremos para el estudio de los espectros obtenidos con SPIDER.

6. Ajustes (comunicación entre ordenador de control y radiotelescopio, puntería)

6.1. Comunicación entre el radiotelescopio SPIDER y el ordenador de control

La comunicación entre el ordenador de control y el radiotelescopio se efectúa mediante dos módem (uno en el extremo del telescopio, rack eléctrico, y otro en el extremo del PC conectado a su puerto serie). La señal se transmite a través de un cable de cuatro hilos por los que circulan las señales.

Si se desean conocer detalles acerca de la integración del módem del lado del radiotelescopio en el receptor, consultar el apartado correspondiente (3.4.).

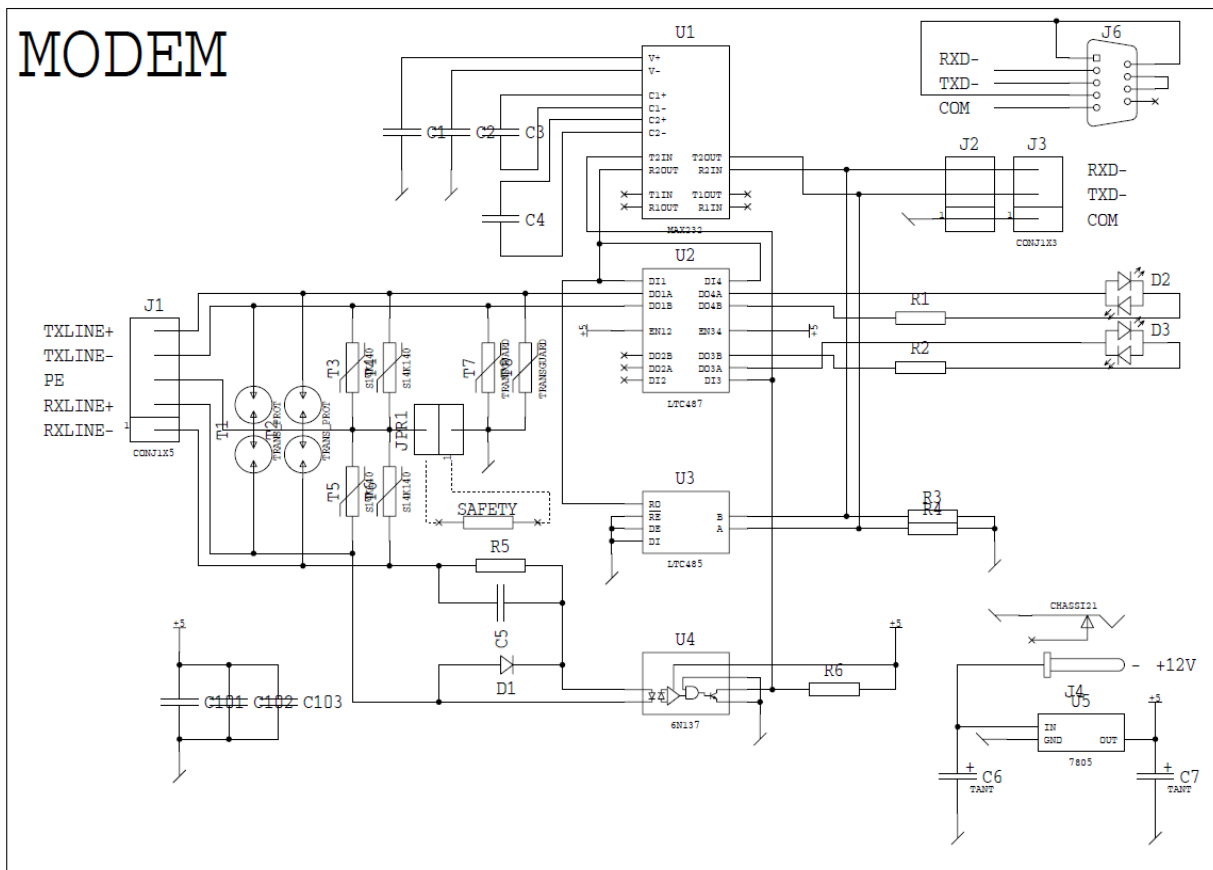


Figura 22: Esquema eléctrico del módem.

El módem está integrado en el rack de recepción y alimentación tal y como indica la figura siguiente.

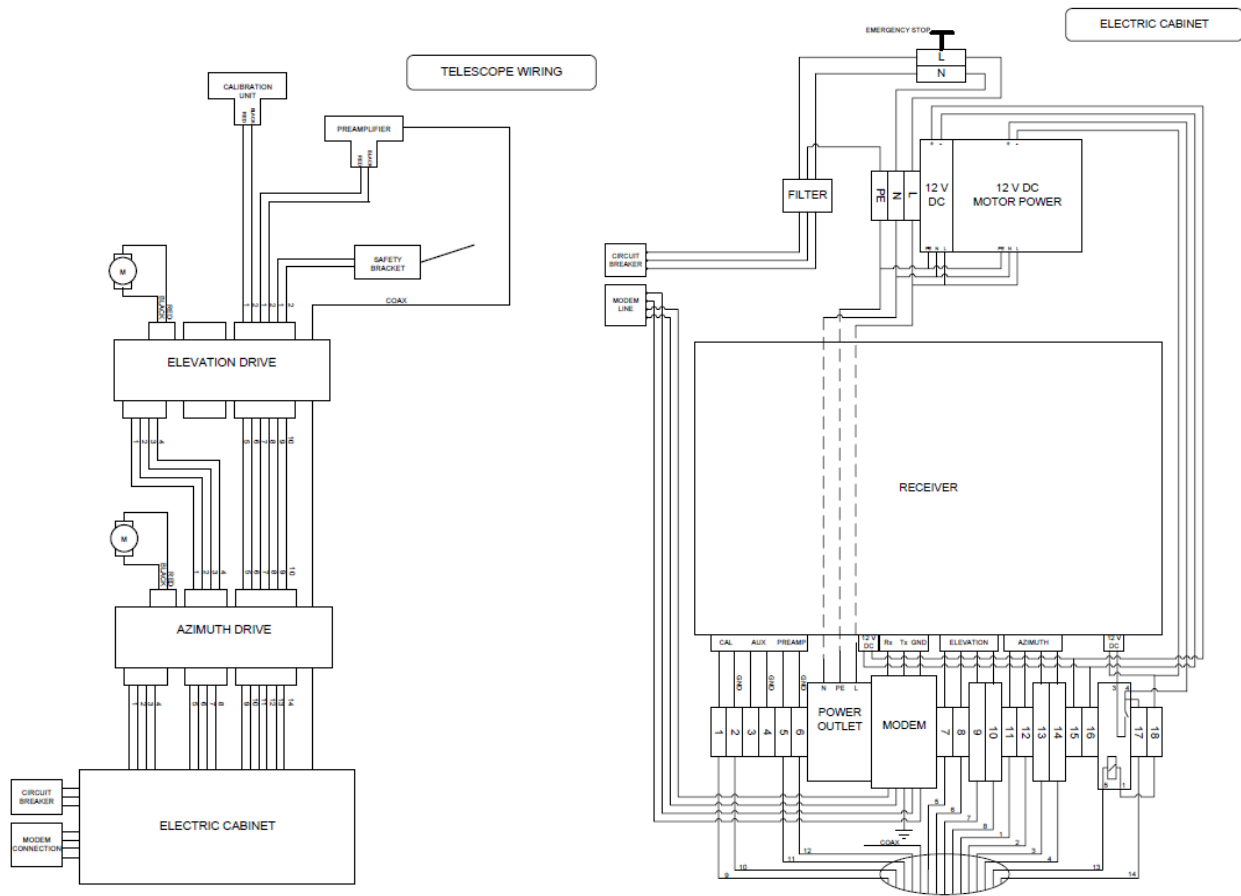


Figura 23: Integración del módem en el sistema.

Los parámetros fundamentales de la conexión son: 9600 baud, no parity, 8 data bits and 1 stop bit (9600-N-8-1).

En las siguientes figuras se muestra el conexionado del módem en el extremo del radiotelescopio.



Figura 24: Módem en el extremo de Spider dentro del rack del receptor.



Figura 25: Entrada/salida de datos desde el rack del receptor.

En la siguiente figura se muestra el conexionado del módem en el extremo del ordenador de control.

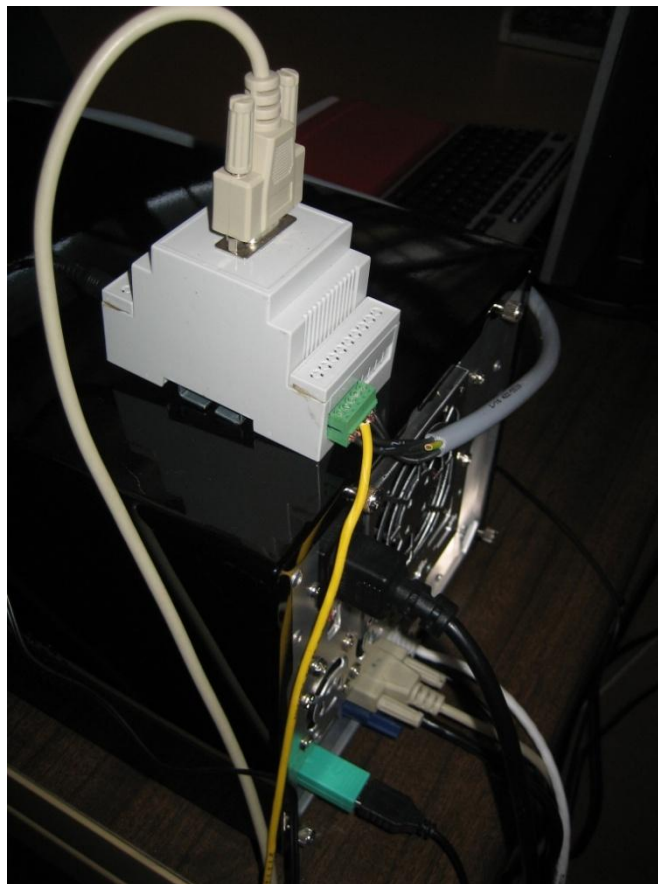


Figura 26: Módem en el extremo del PC de control.

6.2. Conexión en remoto

El sistema está preparado para que se pueda manejar en remoto desde cualquier otro ordenador, instalando el programa VNC Viewer. Sólo hay que abrir el programa, introducir la dirección IP del ordenador de SPIDER y conectarse.

Si hay problemas para conectarse puede que el ordenador esté apagado o que haya sido reiniciado en algún momento. En cualquier caso hay que volver a arrancar el programa que permite utilizar el escritorio virtual.

En remoto: para comprobar que el ordenador está encendido hacemos un *ping* con la dirección IP del ordenador de control de SPIDER y verificamos que recibimos señal, si no es así, hay que encender el ordenador desde la sala de control. Si está encendido, iniciamos una sesión *ssh* con el programa *putty*, que permite abrir un terminal de *hazel*, entonces ejecutamos → `./startVNCserver`.

Desde el ordenador de control: si el ordenador está apagado y tenemos que encenderlo podemos iniciar el servidor del VNC desde este ordenador simplemente abriendo un terminal y ejecutando la instrucción → `./startVNCserver`.

Ya podemos iniciar de nuevo la sesión VNC desde cualquier ordenador.

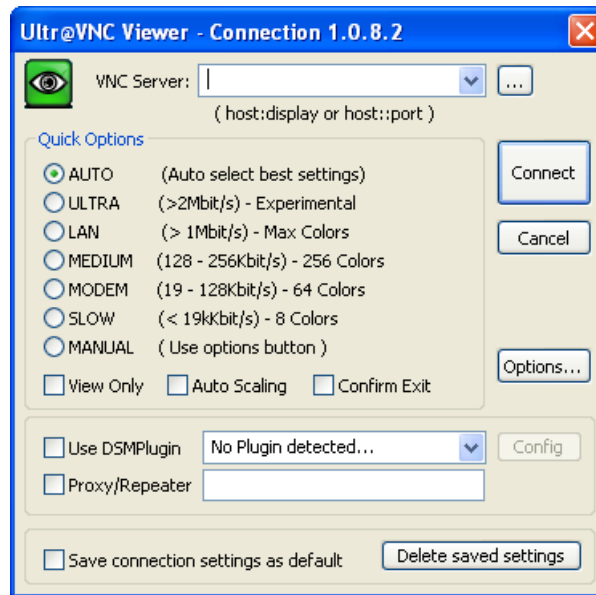


Figura 27: Programa VNC Viewer.

6.3. Puntería, ajuste fino

Para realizar el ajuste fino de la puntería del telescopio utilizando el Sol como referencia, podemos fijarnos en la sombra de la bocina sobre el disco. Hay que empezar reseteando la posición del telescopio, una vez hecho esto se apunta al Sol y se sigue su movimiento. Para hacer puntería al Sol podemos usar el programa KStars (ver 7.1. Preparación de las observaciones). Una vez que estamos apuntando y siguiendo la trayectoria del Sol nos fijamos en la posición de la sombra en la parábola, la puntería será mejor cuanto más centrada esté. Para hacer la corrección de la posición nos vamos al menú *Pointing* del programa QRadio donde podemos introducir el offset necesario en azimuth y elevación, para centrar la sombra. Hay que tomar nota de los valores definitivos cuando los tengamos.

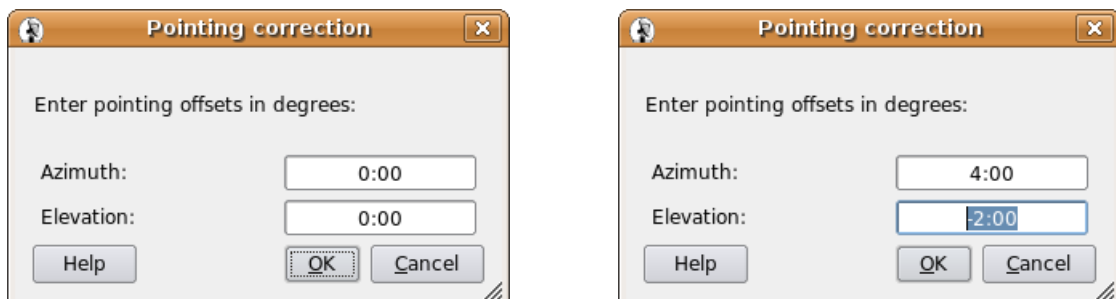


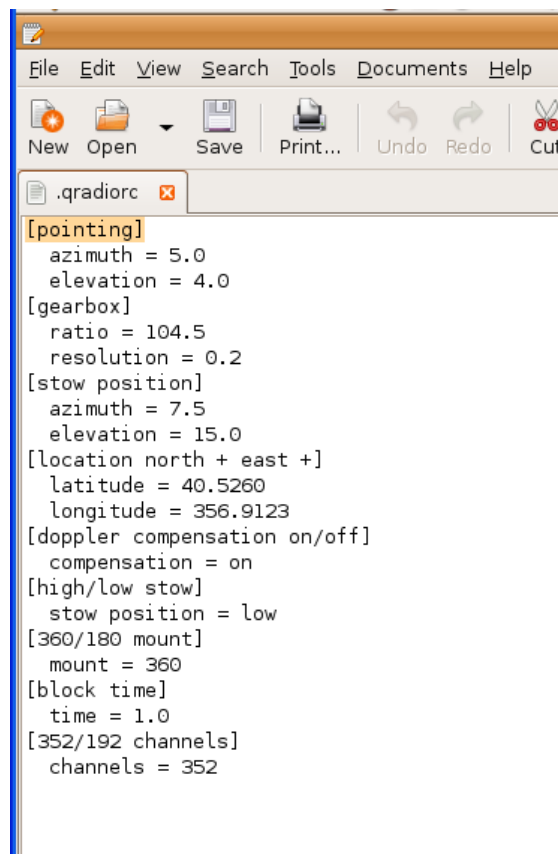
Figura 28: Corrección de la puntería.

Para que el ajuste de puntería no se pierda al cerrar el programa QRadio es necesario que el offset obtenido sea introducido en el archivo de configuración. Para ello desde un terminal, escribimos \rightarrow `sudo gedit .qradiorc` \rightarrow introducimos los nuevos valores en `[pointing]`, sumando o restando el offset a los datos que ya están y guardamos antes de cerrar.

Una vez modificado y guardado, iniciamos QRadio, fijándonos en que aparezcan los nuevos valores y comprobamos de nuevo la puntería.

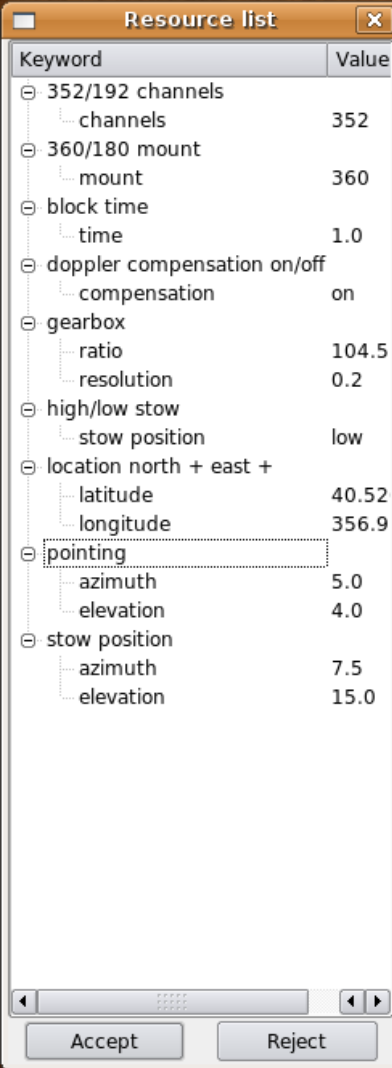
Para un mayor ajuste o si el día está nublado, podemos hacer la puntería fijándonos en los valores de potencia (*Power* del QRadio), cambiando el offset hasta que el valor sea máximo. En caso de conexión en remoto también habrá que hacerlo de esta forma.

El ajuste de la puntería debe ser verificado al principio de cada sesión de observación y corregido cuando sea necesario. Este proceso será realizado por ingenieros de Yebes. Los usuarios remotos siempre tendrán el sistema preparado para observar.

A screenshot of a text editor window titled ".qradiorc". The window has a menu bar with "File", "Edit", "View", "Search", "Tools", "Documents", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for "New", "Open", "Save", "Print...", "Undo", "Redo", and "Cut". The main text area contains the following configuration parameters:

```
[pointing]
azimuth = 5.0
elevation = 4.0
[gearbox]
ratio = 104.5
resolution = 0.2
[stow position]
azimuth = 7.5
elevation = 15.0
[location north + east +]
latitude = 40.5260
longitude = 356.9123
[doppler compensation on/off]
compensation = on
[high/low stow]
stow position = low
[360/180 mount]
mount = 360
[block time]
time = 1.0
[352/192 channels]
channels = 352
```

Figura 29: Editor de QRadio, para modificar los parámetros del archivo de configuración.



Keyword	Value
352/192 channels	
channels	352
360/180 mount	
mount	360
block time	
time	1.0
doppler compensation on/off	
compensation	on
gearbox	
ratio	104.5
resolution	0.2
high/low stow	
stow position	low
location north + east +	
latitude	40.52
longitude	356.9
pointing	
azimuth	5.0
elevation	4.0
stow position	
azimuth	7.5
elevation	15.0

Figura 30: Datos del archivo de configuración que se muestran cuando se abre QRadio.

7. Realización de observaciones

7.1. Preparación de las observaciones

Desde el ordenador situado en la sala de visitas o en remoto a través de la sesión VNC, abrimos los programas QRadio y KStars.

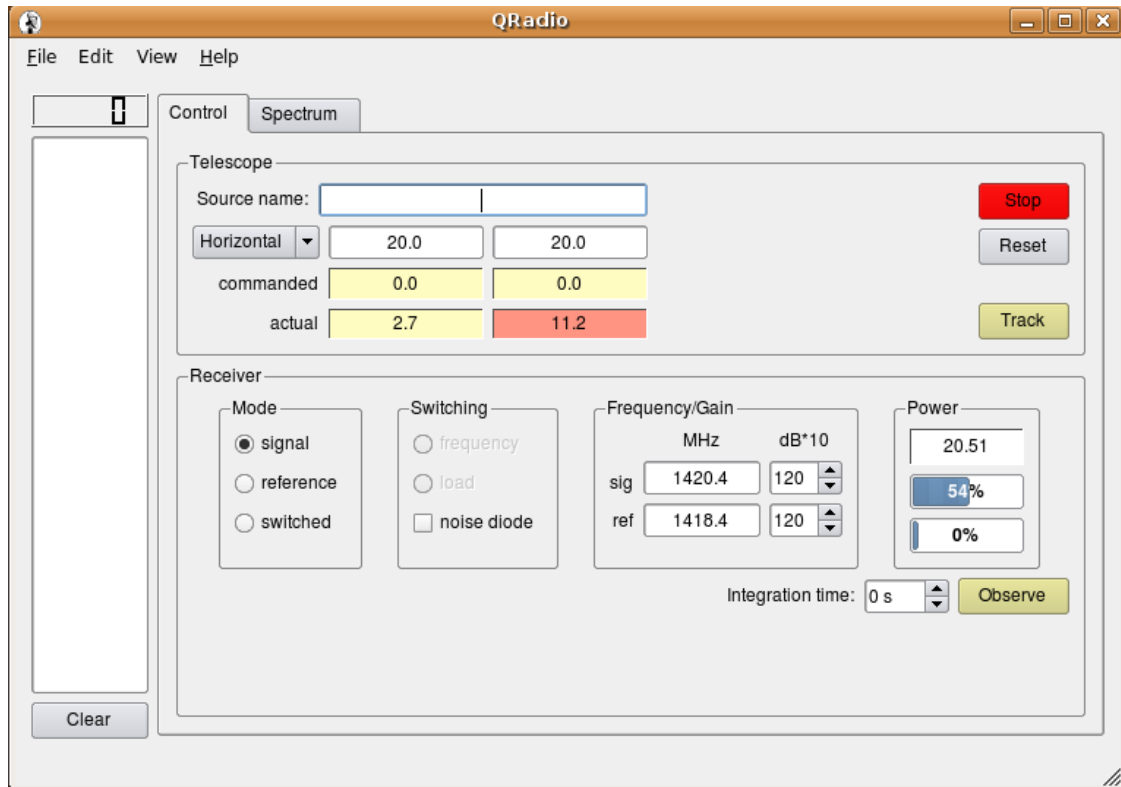


Figura 31: Pantalla de inicio de QRadio.

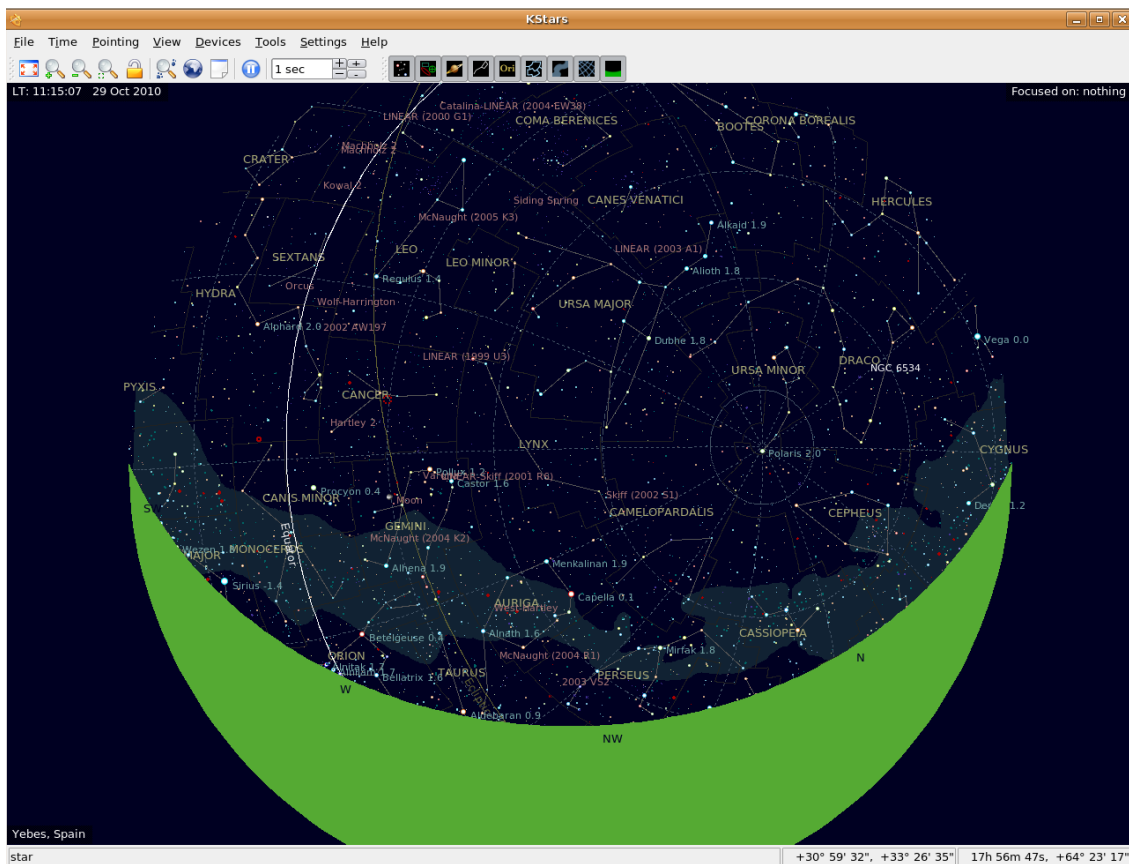


Figura 32: Pantalla de inicio de KStars.

Conexión de KStars con QRadio: en el menú de KStars → *Devices* → *Devices Manager* → *Client* → *hazel* → *Connect* → *Close* (cerrar ventana) → pinchamos con el botón derecho sobre el mapa de KStars → *OSO 2.3m* → *On*.

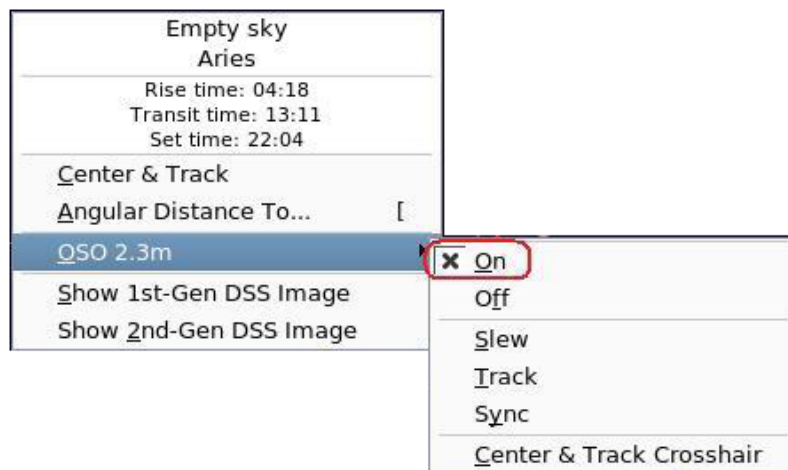
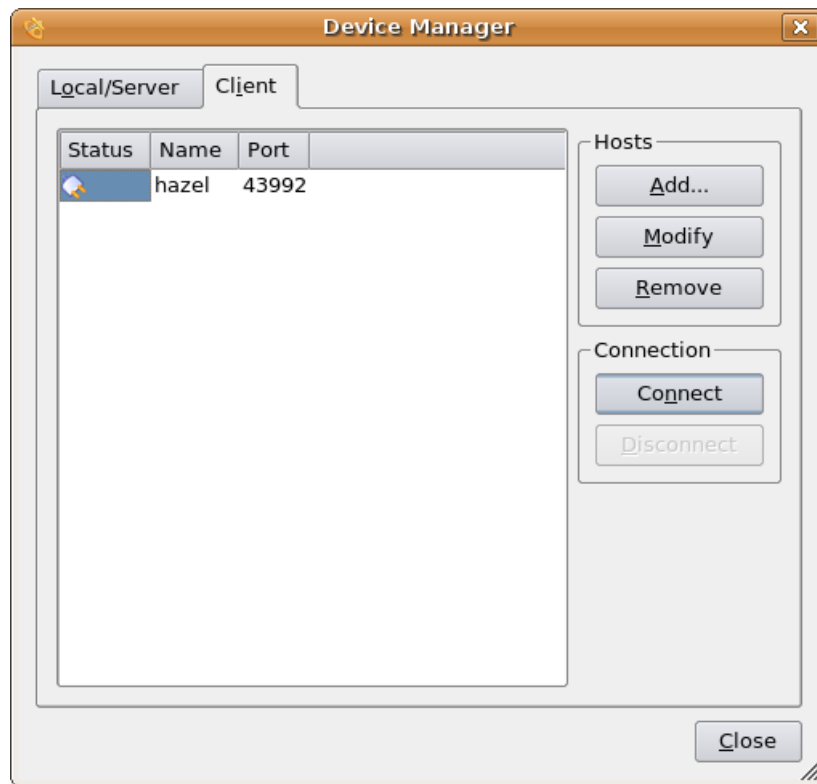


Figura 33: Conexión de KStars con QRadio.

Verificación de la puntería: en el menú de KStars → *Pointing* → *Find Object* → *Sun* → en el mapa, nos situamos sobre el Sol y pinchamos con el botón derecho → *Oso 2.3m* → *Track* → desde QRadio, comprobar que el radiotelescopio se mueve y que al detenerse apunta al Sol. Si la puntería es correcta el nivel de potencia, debajo de *Power* en la pantalla de QRadio, deber ser máximo (alrededor de 11-12, valor específico de nuestro receptor). En el caso de que no sea así hay que corregir la puntería (ver 6.3. Puntería, ajuste fino).

Una vez terminada la comprobación, en QRadio pulsamos *Stop* para detener el seguimiento del Sol.

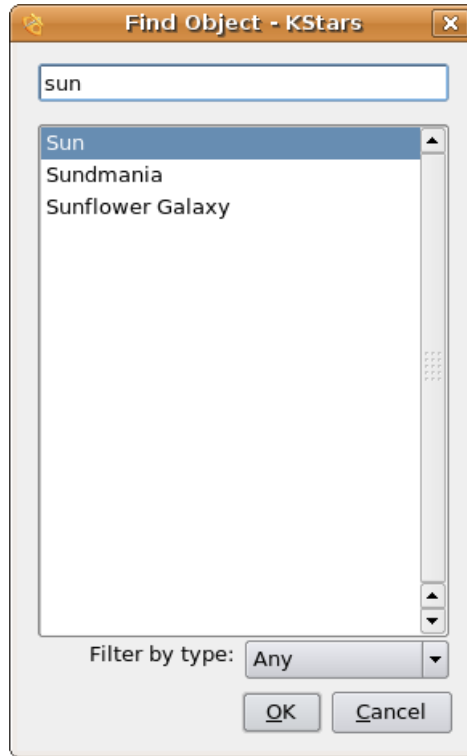


Figura 34: Búsqueda de objetos con el KStars.

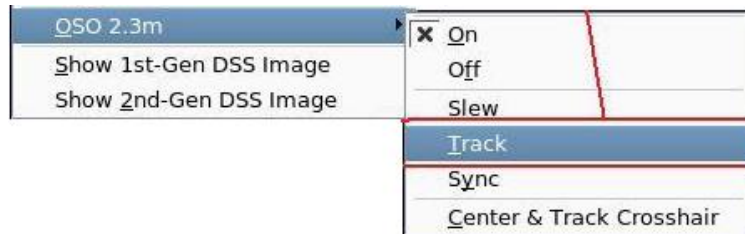


Figura 35: Puntería y seguimiento de objetos con el KStars.

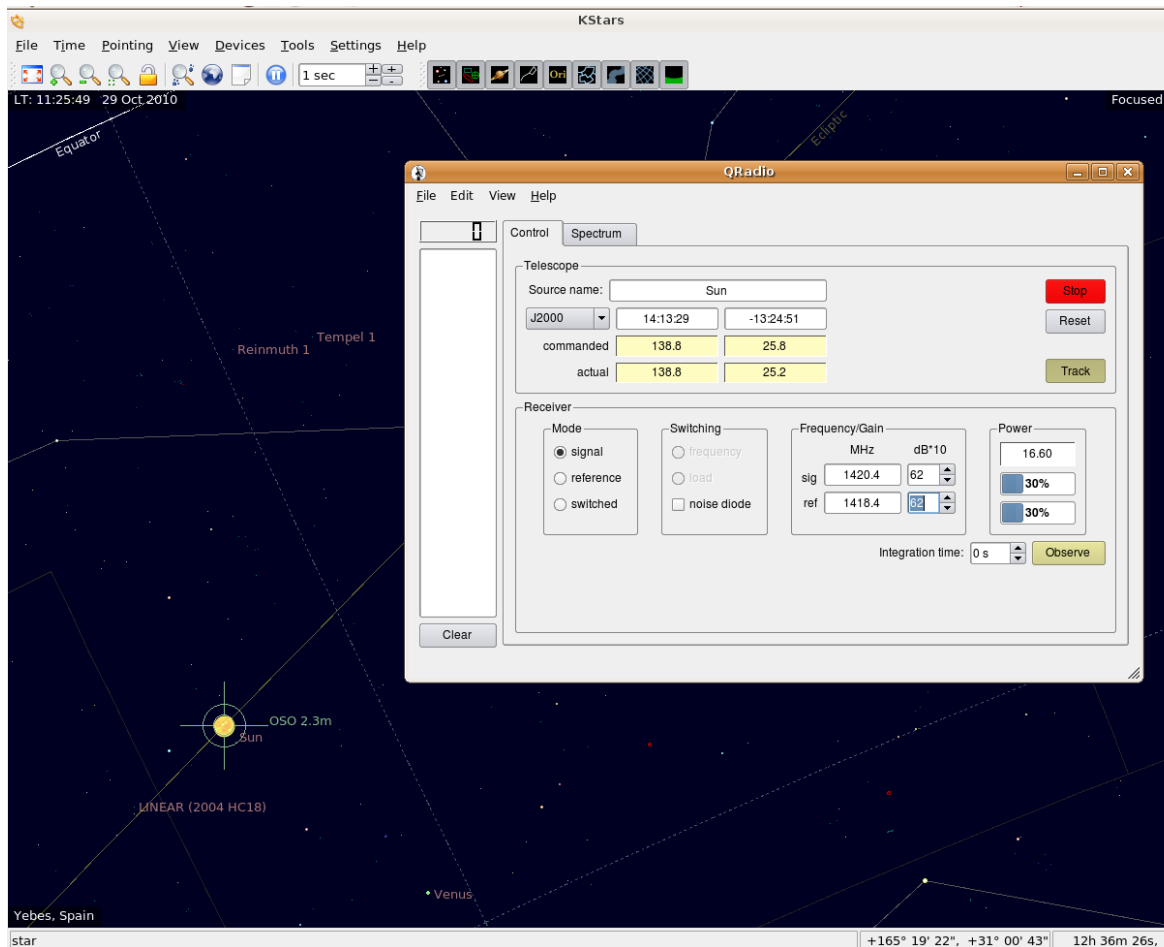


Figura 36: Seguimiento del Sol desde QRadio y KStars.

7.2. Realización de las observaciones

KStars nos ayuda a saber si podemos realizar la observación de la Galaxia, ya que nos muestra la imagen de lo que es visible en el cielo desde nuestra posición en ese momento. Si, por la hora local, apenas se ve la Galaxia no merece la pena hacer un trabajo completo.

Observaciones desde QRadio:

- Antes de introducir nuevas coordenadas, confirmamos que el telescopio está parado, pulsando *Stop*.
- Sección *Receiver*:
 - En *Mode*, seleccionar *switched*.
 - En *Switching*, *frequency* debe estar seleccionado.
 - En *Frequency/Gain*, usar las flechas de la derecha para ajustar los niveles de *dB*10* hasta que los niveles en la sección *Power* estén en el 30%.
 - En *Integration time*, tiempo de observación, con 30-35 segundos será suficiente. Aumentando el tiempo de observación se elimina más ruido y aumenta la sensibilidad, como resultado veremos gráficas más definidas.

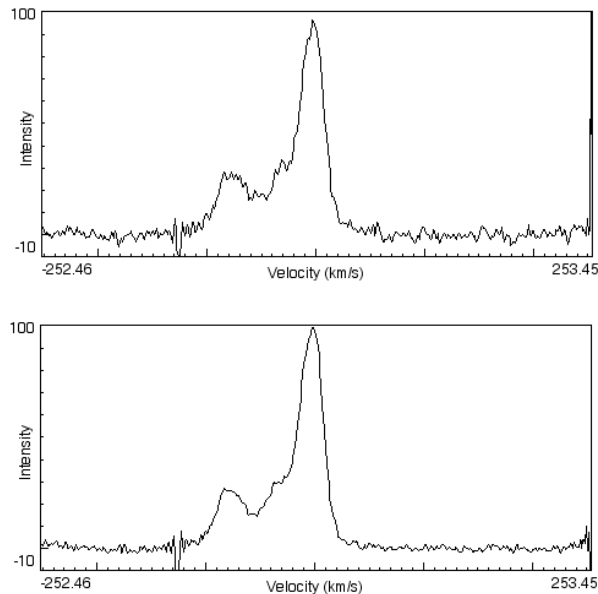


Figura 37: Espectros con diferente tiempo de integración (10s y 60s respectivamente).

- Ahora tenemos que seleccionar la dirección del cielo en la que queremos observar. En la sección *Telescope* → *actual*, podemos ver la posición en la que se encuentra en ese momento el radiotelescopio, el primer dato se corresponde con el azimut y el segundo con la elevación, en grados.
- En *Sistema de Coordenadas* elegimos coordenadas galácticas, *Galactic*. El primer recuadro corresponde con la longitud galáctica l y el segundo con la latitud b . Como las observaciones se realizan en el plano galáctico el valor de la latitud es fijo $b = 0$ y será la longitud l lo que iremos modificando. Teniendo en cuenta que la resolución angular del telescopio es 7 grados, con tomar valores de l de 10 en 10 grados obtendremos el resultado que buscamos, aunque se pueden tomar más próximos si queremos más observaciones. En *Source name* podemos introducir el nombre de lo que estamos observando, por ejemplo "Milky Way". Es conveniente tomar nota de la **longitud galáctica** de cada uno de los espectros que realizamos junto con el **nombre del espectro**. Con el radiotelescopio situado en Yebes sólo podemos hacer observaciones en los dos primeros cuadrantes, $0 < l < 240$.
- Para mover el telescopio hacia la dirección seleccionada, pinchamos en *Track*. En ese momento podemos ver en *commanded*, las coordenadas en azimut y elevación a las que se dirige el telescopio. La **elevación** debe ser **superior a 20 grados**, si no es así presionar *Stop* y seleccionar unas nuevas coordenadas. Mientras que el telescopio alcanza la posición final los recuadros de *actual* están en rojo, alcanzadas las coordenadas se vuelven amarillos.
- Una vez que el telescopio haya alcanzado la posición, podemos realizar el primer espectro, pero antes, si es necesario, hay que retocar el **nivel de dB*10** para que la **potencia** este al **30%**. Esta corrección habrá que hacerla **para cada observación** del telescopio, aunque los valores no cambiarán mucho. Una vez corregida la potencia e introducido el tiempo de integración pulsamos *Observe*.
- El nombre de un archivo aparecerá en la columna de la izquierda (por ejemplo: 00001c.fits, 00003c.fits...). Desde la pestaña *Spectrum*, podemos ver el espectro que hemos tomado. Puede que sea necesario corregir los ejes de la gráfica para ajustarlos al espectro obtenido. En *Edit* → *Plot* → marcamos el eje que vayamos a

corregir e introducimos los valores entre los que oscila el espectro, en principio con corregir el *eje* y será suficiente para comprobar que la observación es correcta y que se aprecian varias componentes en el espectro.

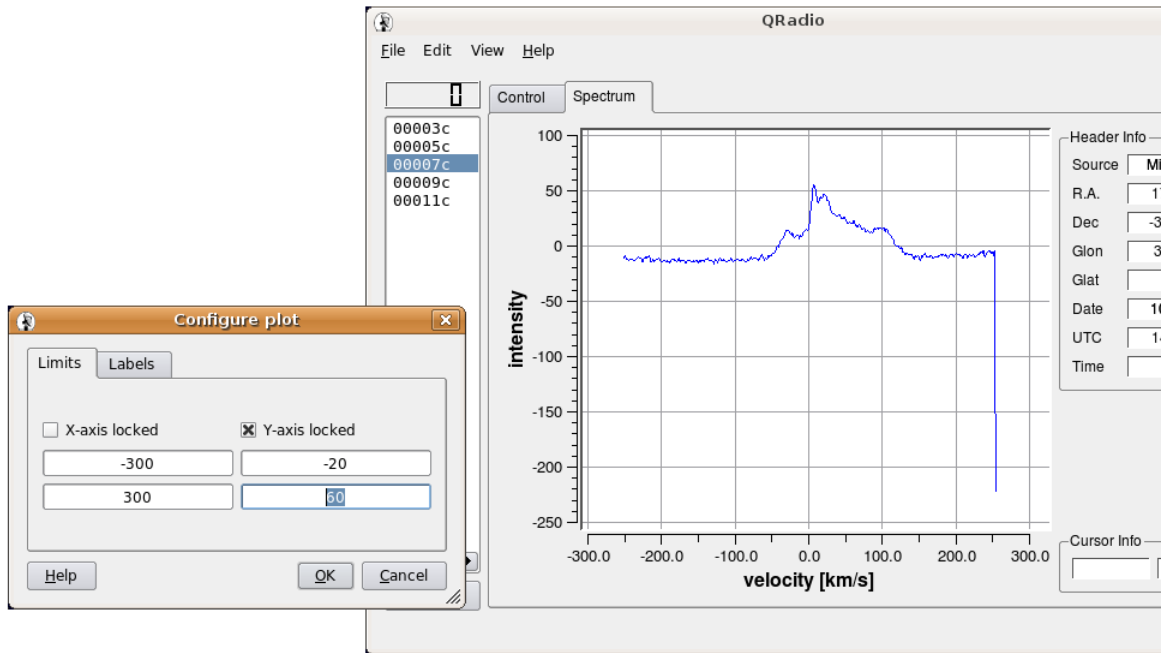


Figura 38: Ajuste los ejes de la gráfica del espectro.

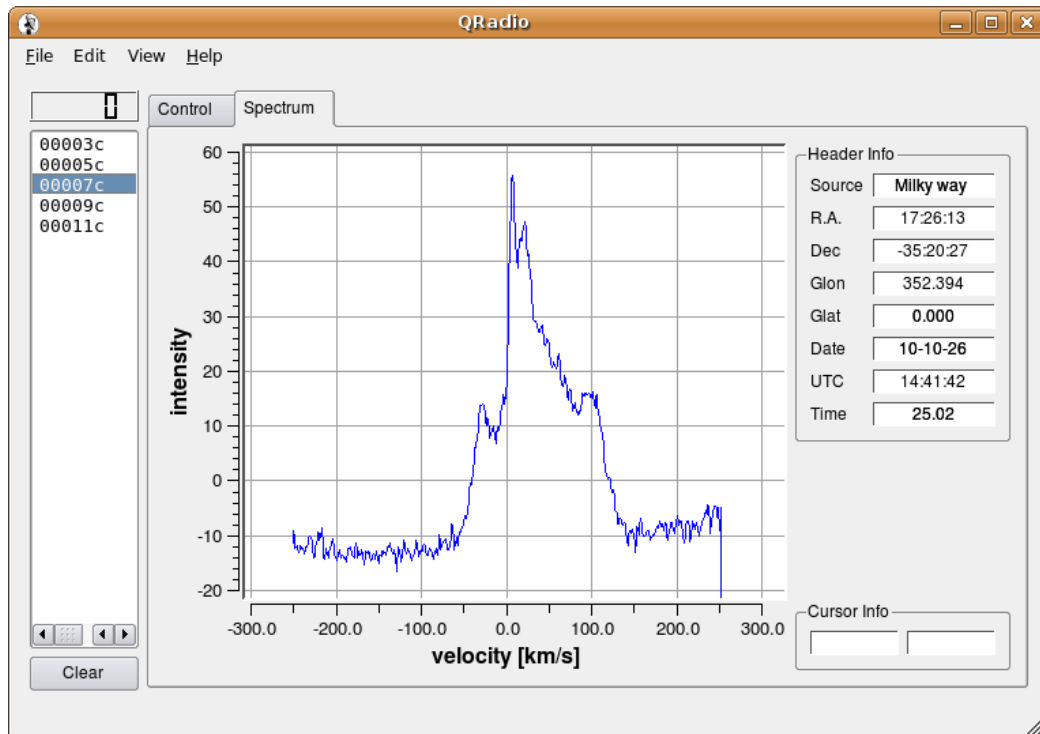


Figura 39: Espectro obtenido.

- Para realizar una nueva observación, volvemos a la pestaña de *Control* y pulsamos *Stop*. Es necesario detener el seguimiento antes de hacer una nueva observación.

Introducimos unas nuevas coordenadas, cambiando el valor de la longitud l . Pulsamos *Track*, esperamos que el telescopio alcance la posición, corregimos la potencia y observamos de nuevo.

- Si queremos borrar algún espectro podemos hacerlo con *Suprimir*, desde el teclado, seleccionando el espectro que queremos eliminar, o borrar todos con *Clear* en QRadio.

7.3. Final de las observaciones

Una vez terminadas todas las observaciones, pulsamos *Reset* para que el telescopio vuelva a la **posición de reposo (stow position)**. Para guardar los espectros realizados debemos ir a *File* → *Save all*, los espectros serán guardados en diferentes archivos FITS. Es buena idea situarlos en una carpeta nueva. Una vez guardados los archivos se puede cerrar QRadio y KStars.

7.4. Análisis de los espectros observados

Para poder analizar los espectros obtenidos necesitamos descargar el programa SalsaJ (en este informe se ha utilizado la versión 1.4 en español). Podemos instalarlo en cualquier ordenador con el que vayamos a trabajar y copiar, si es posible, los archivos FITS del ordenador del radiotelescopio, o trabajar en remoto, ya que el programa también se encuentra instalado en el ordenador de control.

Visualización del espectro: abrimos el programa SalsaJ, en el menú, *Analizar* → *Radio Spectrum* → buscamos la carpeta donde hemos guardado los archivos FITS y abrimos el primero de ellos. El *eje y* se corresponde con la **intensidad** y el *eje x* con la **velocidad**, si no es así desde *Fijar Escala* → *Channel* → *Velocity* → *Vale!*



Figura 40: Visualización del espectro con el programa SalsaJ.



Figura 41: Escala de los ejes de la gráfica.

Eliminación de la línea de base:

- Si los ejes no están ajustados al espectro será mejor ajustarlos antes. En general el *eje x* es correcto y sólo hay que corregir *y*. Desde *Axis Properties* → cambiamos los valores → *Vale!*

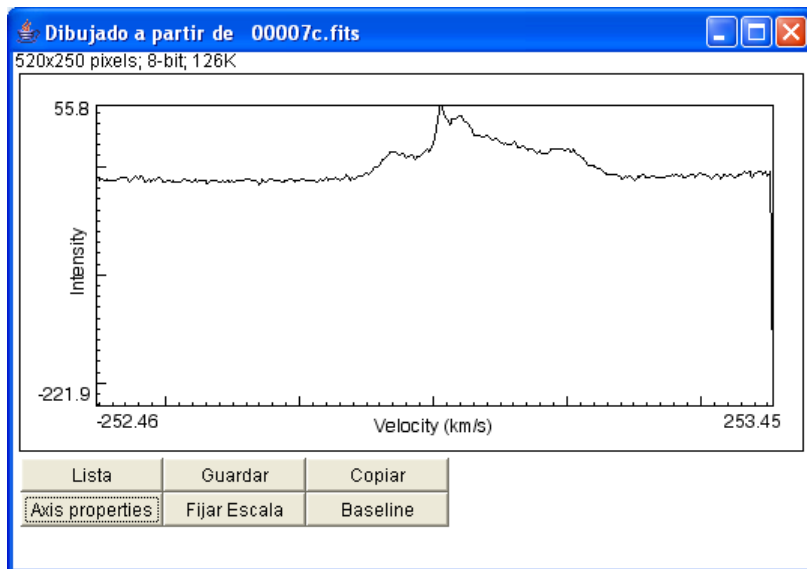


Figura 42: Imagen del espectro sin corregir.

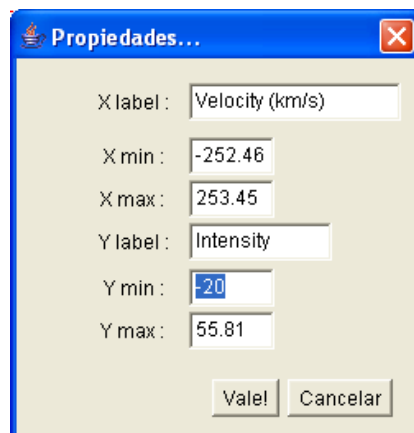


Figura 43: Ajuste de los ejes de coordenadas.

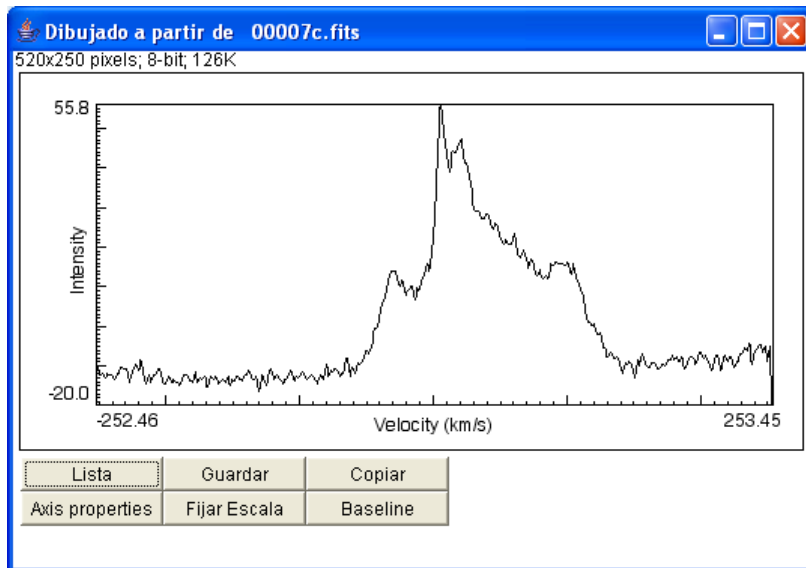


Figura 44: Espectro con los ejes ajustados.

- Para eliminar la línea de base vamos a *Baseline* → elegimos dos intervalos de x , uno antes de la zona de picos y otro después. No hace falta coger hasta los extremos y con un ajuste a una poligonal de orden de uno (línea recta) será suficiente, pero se puede poner más alto si se desea o si se aprecia curvatura en la pendiente de la gráfica. Este paso es importante porque nos puede permitir ver o intuir picos que de otra forma no se verían.

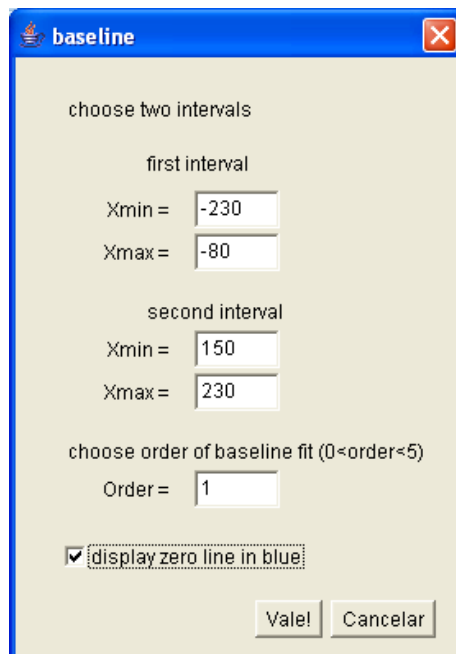


Figura 45: Selección de intervalos para la eliminación de la línea de base correspondientes con la gráfica anterior.

- Una vez introducidos y aceptados los intervalos, en la gráfica podemos ver la línea de base marcada en rojo. Para eliminarla pulsamos → *Subtract Baseline* y volvemos a corregir los intervalos de los ejes, ahora con un mejor ajuste.

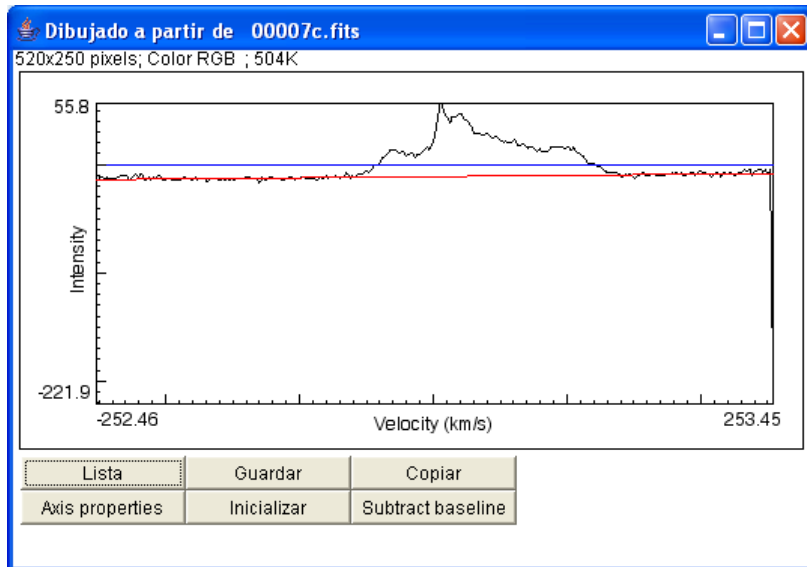


Figura 46: Línea de base en rojo y cero en azul.

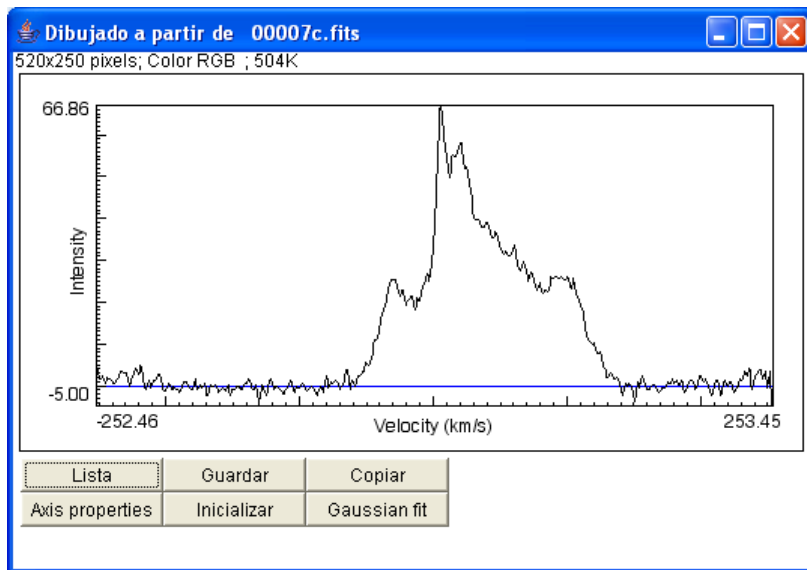


Figura 47: Espectro corregido.

Medida de las velocidades: nosotros queremos medir velocidades en las diferentes componentes de cada espectro. Llegados a este punto podemos abrir una hoja Excel o el Open Office (Linux) para ir introduciendo los datos que obtengamos. En la primera columna de la tabla escribiremos la **longitud galáctica** en la cual el espectro fue tomado y en la segunda la **velocidad** que medimos **para cada componente** de la velocidad.

Tenemos que analizar con cuidado cada espectro para obtener la velocidad de cada componente. Para ello podemos hacer uso del zoom del programa. En la barra de

herramientas, pinchamos en *Zoom*. Situados encima del espectro podemos ampliarlo con el botón izquierdo del ratón o reducirlo con el derecho. Además, situando el cursor en la zona máxima de los picos, abajo a la izquierda podemos leer el valor de la velocidad que nos interesa (valor de la coordenada x).

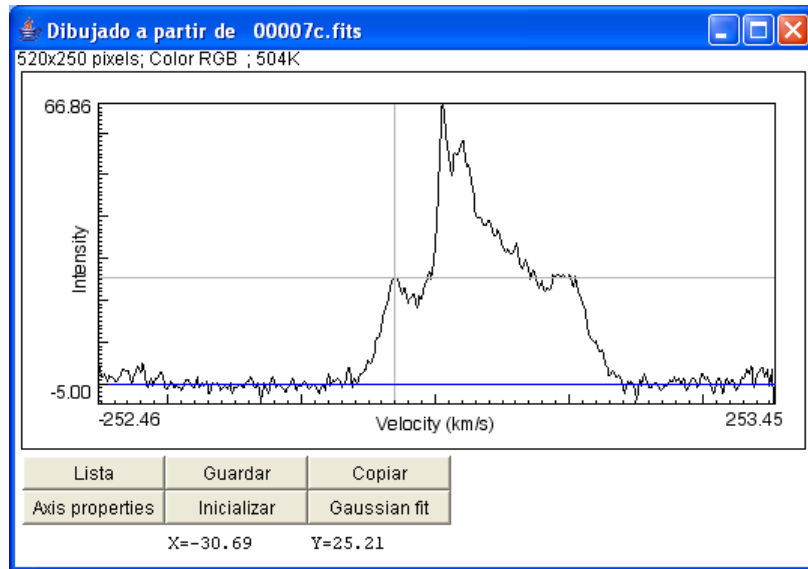


Figura 48: Velocidad de la primera componente, $x = -30,69$.

También podemos ajustar estas velocidades con una curva Gaussiana. Aunque para nuestros propósitos no es necesario, puede resultar útil si hemos olvidado apuntar la longitud galáctica de nuestro espectro, ya que al hacer el ajuste nos aparece una tabla con varios datos, entre ellos la longitud galáctica.

Si el espectro tiene varias componentes, escribiremos varias líneas en la hoja de cálculo, por ejemplo:

l (grados)	V_{rad} (km/s)
Longitud galáctica	Velocidad
15	-12,87
15	5,94
15	21,78
25	-29,7
25	4,95
25	20,79
25	96,03

En este caso el espectro a la longitud galáctica $l = 25$ tiene cuatro componentes de la velocidad y para $l = 15$ tiene tres.

Obtenemos los diferentes valores de la velocidad para todos los espectros que tengamos y vamos completando la tabla.

7.5. Análisis de los datos

7.5.1. Curva de rotación

Para construir la curva de rotación con los datos que hemos reunido, sólo nos interesa la máxima velocidad de cada espectro, $V_{r,max}$, que corresponde con la nube de hidrógeno situada en el punto tangencial.

Para implementar este análisis en la hoja de cálculo necesitamos los valores de R_0 (8,5kpc) y V_0 (220km/s), que podemos introducir en columnas adyacentes a las de velocidad y longitud galáctica, introducir en cada fórmula o definir como constantes en el archivo.

Para calcular la distancia y la velocidad de la nube, R y V , usamos las fórmulas [1]:

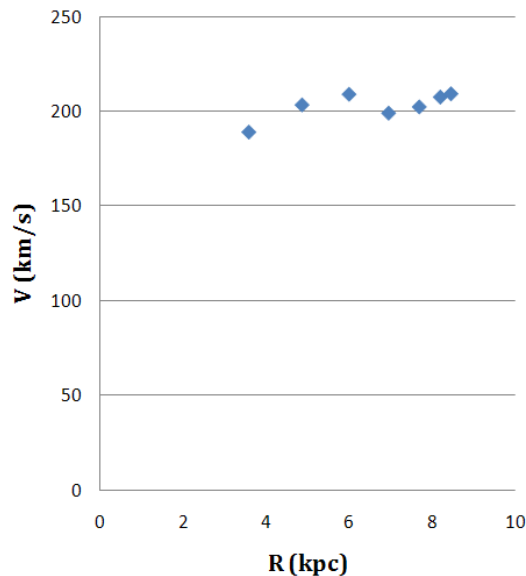
$$R = R_0 \text{sen} l$$

$$V = V_{r,max} + V_0 \text{sen} l$$

Sólo hay que usar valores de l dentro del primer cuadrante entre **0 y 90 grados**. Los puntos cercanos al centro galáctico también hay que eliminarlos, **$R < 4\text{kpc}$** .

Una vez hechos todos los cálculos representando V frente a R en una gráfica, obtenemos la curva de rotación de la Galaxia.

Curva de rotación



l (grados)	$V_{r,max}$ (km/s)	R (kpc)	V (km/s)
25	96,03	3,592	189,00
35	77,22	4,875	203,41
45	53,46	6,010	209,02
55	18,81	6,962	199,02
65	2,97	7,703	202,35
75	-4,95	8,210	207,55
85	-9,90	8,467	209,26

Figura 49: Ejemplo de curva de rotación y tabla de datos obtenidos con Excel.

7.5.2. Mapa de la Vía Láctea

Para obtener el mapa de la Galaxia si utilizaremos todas las velocidades medidas en los espectros, V_r , en todas las diferentes longitudes galácticas, l , además de los valores de R_0 y V_0 . Primero calculamos la distancia al centro de la Galaxia, R , mediante la relación [1]:

$$R = \frac{R_0 V_0 \text{sen} l}{V_0 \text{sen} l + V_r}$$

Ahora calculamos la distancia de la nube de gas al Sol, r , con la ecuación [1]:

$$r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \text{sen}^2 l + R_0 \text{cos} l}$$

A partir de los valores obtenidos de r podemos calcular las **coordenadas cartesianas x e y**.

Como ya comentamos anteriormente, los valores negativos de r deben ser descartados ya que no tienen sentido físico. En los cuadrantes II y III ($90 < l < 270$) sólo puede haber una solución positiva y en los cuadrantes I y IV ($0 < l < 90, 270 < l < 360$) podemos obtener dos soluciones positivas, que también habrá que descartar. Resumiendo:

- Dos soluciones negativas de $r \rightarrow$ descartamos los dos valores
- Dos soluciones positivas de $r \rightarrow$ descartamos los dos valores
- Una solución positiva y otra negativa \rightarrow nos quedamos con el valor positivo para calcular las coordenadas x e y .

Las coordenadas x e y se relacionan con la distancia r y la longitud galáctica l de la siguiente forma [1]:

$$x = r \text{cos}(l - 90)$$

$$y = r \text{sen}(l - 90)$$

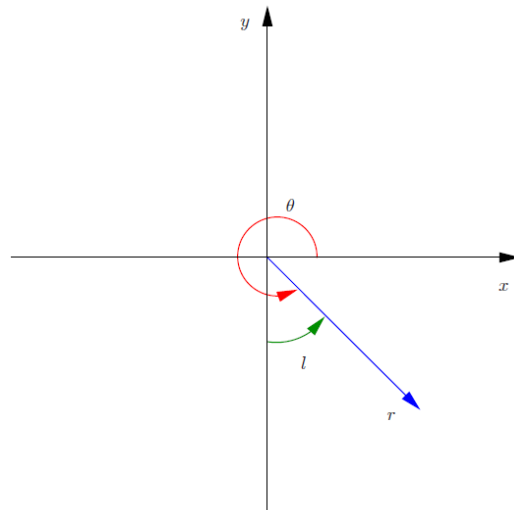
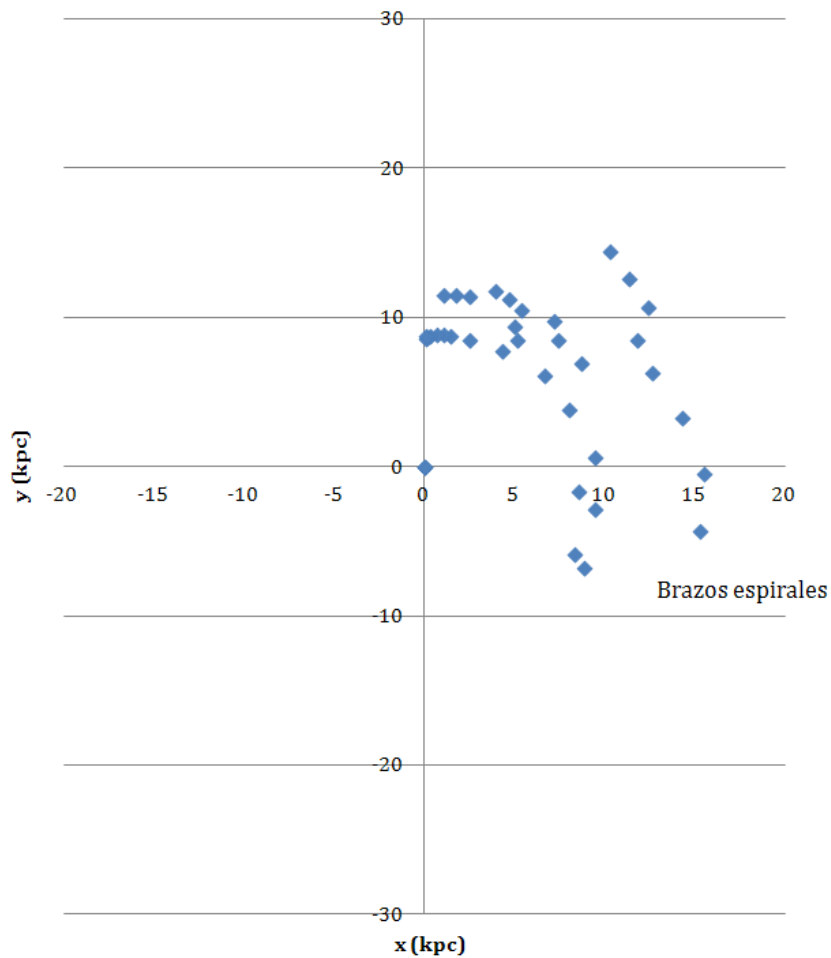


Figura 50: Relación entre coordenadas galácticas (r, l) y cartesianas (x, y).

Para generar la gráfica que nos muestre la estructura de la Galaxia utilizamos los valores calculados de x e y a partir de las soluciones de r válidas.

Estructura de la galaxia



l (grados)	V rad (km/s)	R (kpc)	r (negativa)	r (positiva)		r positiva válida	x	y
...
55	-61,38	12,890	-5,973	15,724	SI	15,724	12,880	-0,519
55	3,96	8,317	0,326	9,425	NO	0,000	0,000	0,000
55	18,81	7,697	1,595	8,155	NO	0,000	0,000	0,000
65	-72,27	13,332	-7,289	14,474	SI	14,474	13,118	2,383
65	2,97	8,375	0,306	6,878	NO	0,000	0,000	0,000
75	-84,15	14,073	-9,229	13,629	SI	13,629	13,165	4,972
75	-4,95	8,703	-0,686	5,086	SI	5,086	4,912	7,184
85	-87,15	14,111	-10,548	12,029	SI	12,029	11,984	7,452
85	-53,46	11,242	-6,654	8,136	SI	8,136	8,105	7,791
85	-9,90	8,902	-2,006	3,488	SI	3,488	3,475	8,196
...

Figura 51: Ejemplo de estructura de la Galaxia y tabla de datos obtenidos con Excel. Se pueden ver claramente dos de los brazos espirales de la Galaxia

8. Conclusión

Con la instalación del radiotelescopio SPIDER se consigue completar una actualización muy importante del pabellón de divulgación del Centro de Desarrollos Tecnológicos de Yebes.

Una de las actividades más importantes del Centro es el desarrollo de instrumentación radioastronómica para equipar el radiotelescopio de 40 metros de diámetro, que forma parte de las redes europeas de VLBI astronómico y geodésico. Debido a que este instrumento se encuentra plenamente operativo, no es factible introducir a grupos numerosos de visitantes en su interior para que puedan conocer los sistemas que lo integran y su principio de funcionamiento.

Ahora, con la existencia de SPIDER, se puede efectuar esta tarea de una forma sencilla, intuitiva y sin tener que interrumpir el normal funcionamiento del 40 metros ni alterar el trabajo diario que en él se realiza.

Con este instrumento se pueden presentar a los grupos de visitantes conceptos básicos de antenas en general y radiotelescopios en particular tales como:

- Concepto de antena y radiotelescopio (pedestal, parábola, foco, alimentador).
- Receptor de radioastronomía.
- Sensibilidad, resolución angular y su relación directa con las características del radiotelescopio.
- Sistemas de control, movimiento en azimut y elevación.
- Software de control, adquisición, procesado y presentación de datos radioastronómicos.
- Conceptos básicos sobre emisión espectral molecular, efecto Doppler y estructura y cinética galáctica.

Una vez adquiridos estos conocimientos básicos, el sistema permite realizar observaciones radioastronómicas complejas, en particular obtener un mapa de la Vía Láctea gracias a la detección de la línea molecular del hidrógeno neutro ($\lambda = 21\text{cm}$).

SPIDER será sin duda una herramienta muy potente que aumentará la capacidad del Centro de Desarrollos Tecnológicos de Yebes para dar a conocer el maravilloso mundo de la radioastronomía.

9. Referencias

- [1] Hands-On Radio Astronomy Mapping the Milky Way. Cathy Horellou, Daniel Johansson. Onsala Space Observatory. 2010.
- [2] SalsaJ, EUHOU.
<http://www.euhou.net/docupload/files/software/manuel/Documentation.html>
- [3] Hazel Manual Rev 1.1. Rune Byström. Are Elektronik (are.elektronik@telia.com). Sweden.
- [4] Manual och laborationshandledning till litet radioteleskop. Kungälv, Sweden.
- [5] Tools of Radio Astronomy. T.L. Wilson, K. Rohlfs, S. Hüttemeister. Springer.
- [6] Radio Astronomy. J.D. Kraus.
- [7] Antenna Theory: Analysis and Design. C.A. Balanis.

10. Anexo

Ejemplo de plantillas para la realización de las observaciones y los cálculos necesarios para la obtención de la curva de rotación y la estructura de la Galaxia.

Mapa de la Vía Láctea

Centro de Desarrollos Tecnológicos de Yebes
Junio 2012

Curva de rotación

Sólo usamos la máxima velocidad

	l (grados) Longitud galáctica	V rad (km/s) Velocidad (km/s)	R0 (kpc) Dist. Sol	V0 (km/s) Vel. Sol	R (kpc) Dist. Centro Gal.	V (km/s) Vel. Nube
Ejemplo	20	-43	8,5	220	19,835291	-11,633701
	20	-25			12,729324	-4,405516
	20	46			5,275110	3,585667

Copiar datos y arrastar hacia abajo las fórmulas del ejemplo

Columnas gráfica curva de rotación
(para R>3 y l<90)

Estructura espiral

	r (positiva) Dist. Nube al Sol	r (negativa) Dist. Nube al Sol	R (kpc) Dist. Centro Gal.	r (válida)	x	y
	27,608476	27,608476	19,835291	27,608476	9,442655	-17,443481
	20,380291	20,380291	12,729324	20,380291	6,970470	-10,651209
	12,389107	12,389107	5,275110	0	0	0

Columnas gráfica estructura de la Galaxia

Mapa del plano galáctico (observando de ___ a ___ UT entre las constelaciones de ___ y ___) a ___ de ___ de 20___

l (grados)	V rad (km/s)	R0 (kpc)	V0 (km/s)	R (kpc)	V (km/s)	r (positiva)	r (negativa)	R (kpc)	r (positiva)	r (negativa)	verdadero/falso	verdadero/falso	r (válida)	x	y
		8,5	220												