



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA  
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

SISTEMA PARA DETECCIÓN Y  
MEDICIÓN DE RFI EN LAS  
BANDAS HF/VHF PARA  
RADIOASTRONOMÍA

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:

CÉSAR IVAN VICTORIA CEBALLOS

TUTOR:

DR. STANLEY E. KURTZ SMITH, INSTITUTO DE  
RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



*A*  
*mi familia*

*En el fondo, los científicos somos gente con suerte:  
podemos jugar a lo que queramos durante toda la vida.*  
*Lee Smolin (1955 -?) Físico teórico y cosmólogo.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1. La Radioastronomía. . . . .	7
1.2. Radioastronomía a frecuencias bajas . . . . .	11
<b>2. La RFI en radioastronomía</b>	<b>15</b>
2.1. La UIT, su papel y funciones. . . . .	18
2.2. Efectos de RFI en Radioastronomía. . . . .	22
2.3. Métodos de mitigación de RFI. . . . .	25
2.4. Ejemplos numéricos. . . . .	28
<b>3. Instrumentación para la detección de RFI</b>	<b>31</b>
3.1. Antenas y parámetros de antenas . . . . .	31
3.2. Analizadores de espectros. . . . .	36
3.3. Teoría del procesamiento digital de señales . . . . .	39
3.3.1. Digitalización de una señal. . . . .	39
3.3.2. Aliasing y réplicas espectrales. . . . .	42
<b>4. Diseño y metodología</b>	<b>47</b>
4.1. La antena. . . . .	48
4.1.1. Trabajo sobre la antena. . . . .	51
4.2. Filtro pasa bajas. . . . .	52

4.3.	La radio definida por software. . . . .	54
4.3.1.	La SDR. . . . .	54
4.3.2.	El USRP. . . . .	55
4.4.	GNU radio y GNU radio Companion. . . . .	58
4.5.	Prueba de funcionamiento del USRP con GNU radio. . . . .	69
4.6.	Protocolo de Barrido de frecuencias . . . . .	71
4.6.1.	Escaneo analógico de prueba. . . . .	73
<b>5.</b>	<b>Resultados e identificación de interferencia.</b>	<b>75</b>
<b>6.</b>	<b>Barrido analógico direccional</b>	<b>83</b>
6.1.	Protocolo de barrido direccional . . . . .	84
<b>7.</b>	<b>Análisis y recomendaciones</b>	<b>97</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>101</b>
8.1.	Conclusiones . . . . .	101
8.2.	Trabajo a futuro . . . . .	103
<b>9.</b>	<b>Apéndice</b>	<b>105</b>
9.1.	Conceptos y unidades útiles . . . . .	105
9.2.	Combinadores, filtro, Bias-Tee y coaxial. . . . .	107
9.3.	Código de grafo A . . . . .	113
9.4.	Código de grafo B . . . . .	122
9.5.	Código de barrido de frecuencias . . . . .	130
9.6.	Muestreo pasa bandas y conversión de bajada . . . . .	132

# Presentación

La interferencia de radiofrecuencia, RFI, representa una problemática creciente para el campo de la radioastronomía, al ser generada por cualquier dispositivo funcionando en el régimen del radio, como los sistemas de telecomunicaciones, y estos a su vez, están en constante avance y evolución tecnológica. Es así como se vuelve una necesidad el estudio y monitoreo del régimen de radio en el espectro electromagnético para poder realizar observaciones de radioastronomía, sin resultar éstas comprometidas por la degradación consecuente de la RFI.

Pensando en esta necesidad, se ha creado un sistema digital de detección de RFI para radioastronomía a bajas frecuencias. El motivo del presente proyecto es comprender y apreciar los procesos y problemas involucrados en la detección de RFI. Así se puede contemplar la creación de un sistema flexible que sea aplicado en cualquier sitio donde se pretenda realizar un estudio del ambiente electromagnético, adaptándolo al rango frecuencial de observación añadiendo los mínimos elementos.

Así, el primer capítulo de esta tesis da una visión general de la radioastronomía y la radioastronomía a bajas frecuencias.

En el segundo capítulo se explica a fondo la RFI, su origen y características, los efectos que provoca en las observaciones de radioastronomía y una visión general de los métodos de escisión y mitigación de RFI que son utilizados en la actualidad. Además se habla sobre el papel de los organismos nacional e internacional que asignan bandas de frecuencias a distintos servicios y la legislación vigente, que protege a la radioastronomía de la RFI. Algunos ejemplos para dimensionar las diferencias entre la potencia de señales de RFI y la señal de un objeto astronómico son mostrados también.

El tercer capítulo habla sobre las antenas y los analizadores de espectros como instrumentos para la detección de RFI. Las diferencias entre los tipos de antenas y los analizadores analógicos y digitales son mencionadas.

El capítulo cuatro trata de la metodología y el sistema de detección realizado. Las antenas,

la utilización como hardware de la Radio Definida por Software, que vuelve flexible el sistema, y el software utilizados son descritos en detalle.

En el capítulo cinco se muestran los resultados del escaneo realizado al espectro y la RFI identificada producto de este escaneo.

En el capítulo seis se describe un barrido direccional que, debido a las limitaciones de realizarlo a las frecuencias bajas de estudio, fue realizado en un rango de alta frecuencia. El proposito de este barrido es mostrar la forma de hacer un escaneo para búsqueda de RFI más completo al agregar la direccionalidad.

El capítulo siete muestra el análisis de los resultados de la RFI encontrada, y se dan las recomendaciones respecto a la situación concluida en relación a la ocupación del espectro radioeléctrico en el sitio.

Finalmente, el capítulo ocho, muestra las conclusiones de la tesis y el trabajo a futuro para mejorar y perfeccionar el sistema construido.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. La Radioastronomía.

La radioastronomía es la rama de la astronomía que estudia los objetos y fenómenos astronómicos por medio de observaciones en el rango de radio del espectro electromagnético, que va aproximadamente de 10 MHz a 600 GHz (longitudes de onda entre los 30 m y 0.5 mm).

Aunque la atmósfera terrestre es opaca a varias longitudes de onda, no es para la región del radio (y algunas otras ventanas más del espectro). En la ventana del radio, para altas frecuencias la atmósfera se vuelve opaca por absorción en la tropósfera. Moléculas de  $H_2O$  y  $O_2$  son las principales responsables de esto, moléculas de  $N_2$  y  $CO_2$  absorben a frecuencias mayores a los 300 GHz. A frecuencias bajas (menores que unos cientos de MHz) la atmósfera comienza a volverse opaca por absorción por la ionósfera debido a la densidad electrónica, ya que si la frecuencia de plasma es mayor a la frecuencia de radiación no es posible la transmisión a través de la ionósfera. La figura 1.1 muestra la transmisión atmosférica para la radiación electromagnética.

A su vez, la ventana del radio en el espectro electromagnético ha sido dividida en bandas de acuerdo a rangos de frecuencia. La tabla 1.1 muestra las bandas del espectro radioeléctrico (col. 1), las correspondientes frecuencias y longitudes de onda (col. 2 y 3), y algunos ejemplos de uso de cada banda (col. 4) [55].

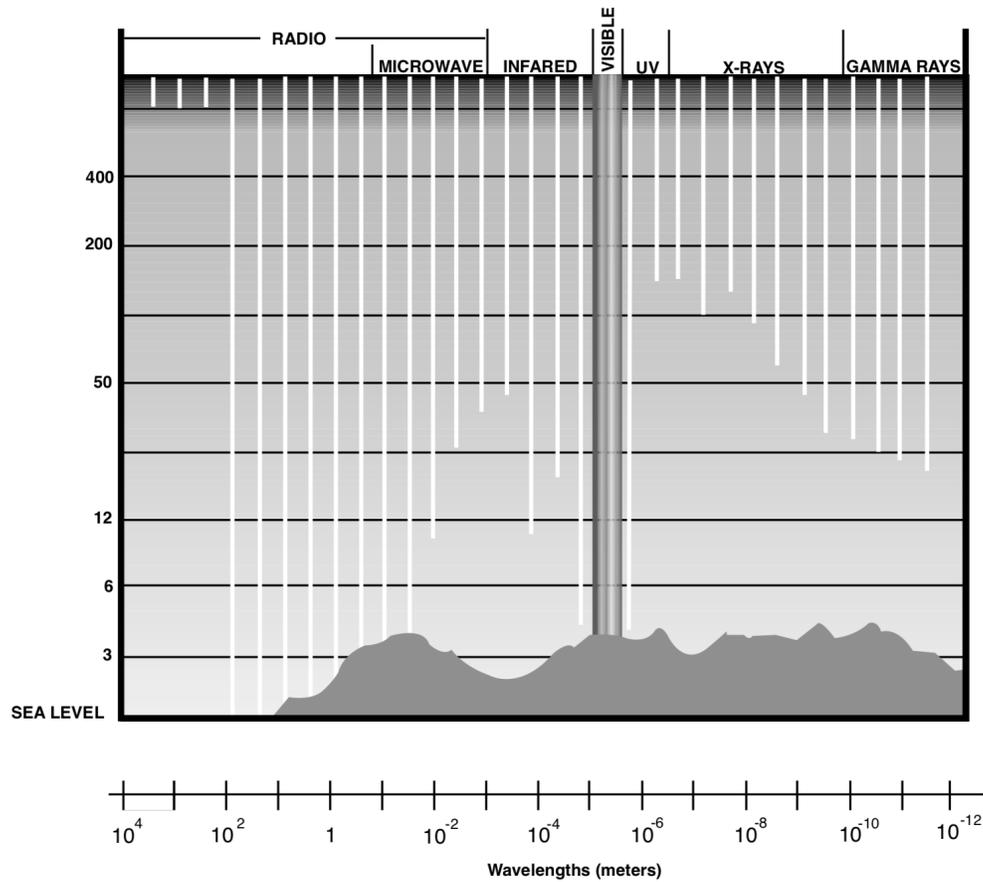


Figura 1.1: Transmisión atmosférica (escala vertical en km). Obtenida de [https://www.nasa.gov/pdf/319904main\\_The\\_Electromagnetic\\_Spectrum.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/319904main_The_Electromagnetic_Spectrum.pdf).

Banda	Frecuencia	Longitud de onda	Ejemplos de uso
Muy baja frecuencia (VLF)	3 - 30 kHz	100 - 10 km	radionavegación, comunicación submarina
Baja frecuencia (LF)	30 - 300 kHz	10 - 1 km	radionavegación
Frecuencia media (MF)	300 kHz - 3 MHz	1 km - 100 m	radio AM
Alta frecuencia (HF)	3 - 30 MHz	100 - 10 m	radio de onda corta, telefonía de radio móvil y marina
Muy alta frecuencia (VHF)	30 - 300 MHz	10 - 1 m	radio FM, televisión VHF
Ultra alta frecuencia (UHF)	300 - 3 GHz	1 m - 10 cm	WLAN, bluetooth, televisión UHF, horno de microondas, GPS
Super alta frecuencia (SHF)	3 - 30 GHz	10 cm - 1 cm	WLAN, comunicación satelital, radioastronomía
Extremadamente alta frecuencia (EHF)	30 - 300 GHz	10 - 1 mm	WLAN, radioastronomía

Tabla 1.1: Bandas del espectro radioeléctrico.

El desarrollo de la radioastronomía abrió la primera ventana de estudio después del óptico para la astronomía. Esto permitió observar la emisión en radio de objetos astronómicos como el gas interestelar, los jets, AGNs y la radiación cósmica de fondo, pudiendo entender de mejor manera la naturaleza de estos objetos y con ello más sobre el universo en sí. Actualmente la Astronomía usa todo el espectro electromagnético como medio de estudio, además de partículas como neutrinos y rayos cósmicos, e incluso más recientemente las ondas gravitacionales.

La radioastronomía surge en la década de 1930 con los trabajos de Karl Guthe Jansky mientras trabajaba como ingeniero de los Bell Telephone Laboratories en New Jersey. Jansky construyó una antena para recibir ondas de radio a 20.5 MHz (14.6 m), con el fin de investigar la dirección de la que provenían las interferencias en el servicio trasatlántico de radiotelefonía. La figura 1.2 muestra la antena construida por Jansky. Él identificó tres fuentes diferentes de interferencia: estática de tormentas locales, estática de tormentas lejanas y un ruido constante de origen desconocido. Jansky estudió este ruido de origen desconocido durante varios meses y finalmente concluyó que tenía un origen fuera de la Tierra, proveniente de la constelación de Sagitario en dirección del centro de la Galaxia.

Jansky propuso una antena de haz estrecho para poder resolver la señal con mayor claridad pero fue asignado a otro trabajo después de publicar sus resultados en 1932, por lo que no continuó con su investigación sobre la radiación proveniente del centro galáctico.

El segundo pionero en la radioastronomía fue Grote Reber. Reber fue un ingeniero Estadounidense quien, interesado en los resultados encontrados por Jansky sobre la interferencia originada en el centro galáctico, comenzó un estudio sobre ésta. Construyó una antena de 9.5 metros de diámetro y comenzó a trabajar con ondas de 9.1 cm (3300 MHz) esperando detectar radiación extraterrestre, pero fracasó en ese intento. Posteriormente lo intentó con ondas de 33 cm (910 MHz) obteniendo el mismo resultado negativo. En su tercer intento su receptor operaba a 160 MHz (ondas de 1.87 metros), y con él pudo detectar áreas de fuerte radiación hacia el centro galáctico, finalmente logró verificar los resultados de Jansky. Reber continuó su investigación durante años posteriores y realizó el primer mapa de radio del cielo, que publicó en 1944 (figura 1.3).

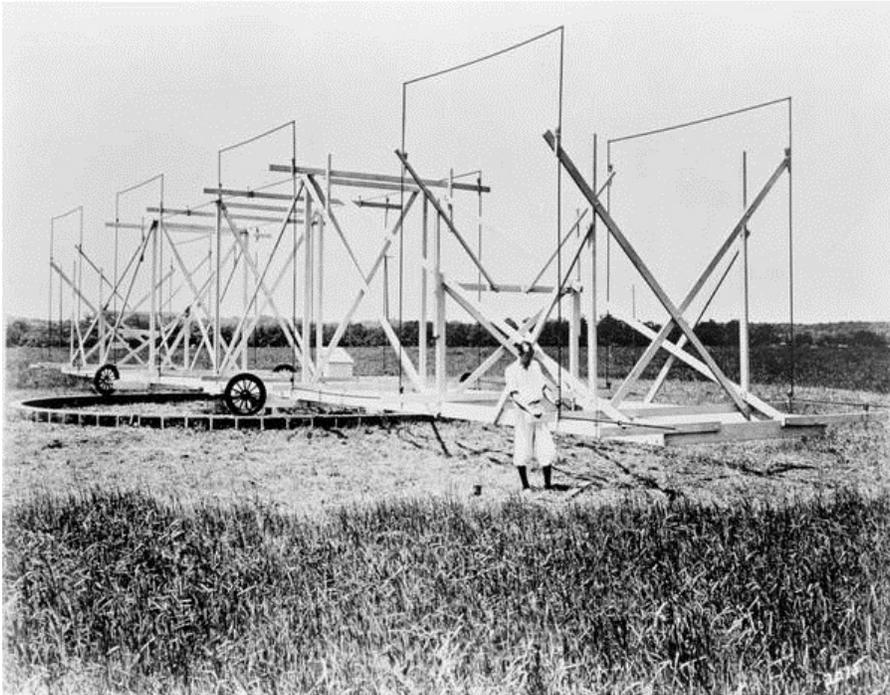


Figura 1.2: Antena a 20.5 MHz construida por Jansky. Obtenida de [https://www.nrao.edu/whatisra/hist\\_jansky-s.shtml](https://www.nrao.edu/whatisra/hist_jansky-s.shtml).

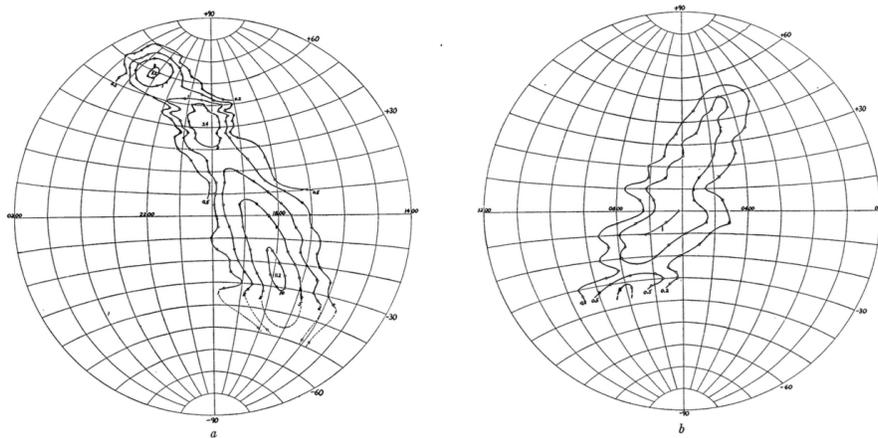


Figura 1.3: Mapa de emisiones en radio a 160 MHz de la Vía Láctea hecho por Reber.

Actualmente existe un gran número de radiotelescopios alrededor del globo observando en diferentes longitudes de onda. Los hay de un sólo plato, como el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) en México o el radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico, así como de múltiples discos

tales como el Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en Chile y el Very Large Array (VLA) en Estados Unidos. El rango de frecuencias cubierta es de aproximadamente 75 MHz hasta 350 GHz. La mayoría de estos radiotelescopios están ubicados en sitios aislados, en parte para protegerlos de la RFI.

## 1.2. Radioastronomía a frecuencias bajas

La investigación en las frecuencias bajas, donde comienza la radioastronomía, ha ido en aumento en años recientes. Importantes estudios de radiofuentes se realizan en las frecuencias más bajas del régimen del radio; el estudio de los rayos cósmicos, planetas extrasolares, de púlsares y estudios del Sol son ejemplos de esto. En los siguientes párrafos se describen estas radiofuentes emisoras a bajas frecuencias.

**Rayos cósmicos:** El origen de los rayos cósmicos de ultra-alta energía (UHECR) es un tema aún desconocido. El estudio a través de la emisión de radio que se genera por las cascadas de electrones y muones en la atmósfera ha significado un gran avance en el entendimiento de estos eventos. Estas partículas cargadas, producidas por la interacción de los CR con la atmósfera sufren una fuerza por el campo magnético de la tierra, como resultado emiten radio-ondas.

Un ejemplo de estas investigaciones es el proyecto LOPES (LOFAR Prototype Station). LOPES es un radiointerferómetro digital que mide la emisión en radio de las cascadas de electrones a frecuencias entre  $\sim 20$  y  $\sim 80$  MHz. Para una lectura sobre los detalles acerca de este proyecto, vease [26].

**Planetas extrasolares:** Se sabe que todos los planetas en el sistema solar que tienen campos magnéticos producen emisión coherente. Se espera que a través de la emisión de baja frecuencia se puede detectar planetas extrasolares. Dado que la frecuencia máxima de emisión de estos planetas está asociada con la intensidad de su campo magnético, estudios de este tipo ayudan en la determinación de la intensidad de dicho campo, que como es bien sabido, la presencia de campos magnéticos en los planetas tiene vital importancia en la retención de la atmósfera planetaria, que representa una característica necesaria para el desarrollo de la vida.

En el sistema solar, la emisión más intensa en longitudes de onda decamétricas es la radia-

ción del planeta Jupiter. Su emisión a bajas frecuencias es anisotrópica y variable en distintas escalas de tiempo, originadas por distintas componentes [37].

**El Sol:** Las explosiones solares de radio se dan mayormente a bajas frecuencias ( $<200$  MHz), debidas a fenómenos como llamaradas, eyecciones de masa coronal y ondas de choque magnetohidrodinámicas. Un aspecto importante de estudiar el comportamiento del Sol y entender su actividad es que puede extrapolarse a otras estrellas y con ello mejorar el entendimiento de estos objetos astronómicos.

La figura 1.4 ejemplifica como se ve el espectro de radio emisión solar en el rango de 8-32 MHz, obtenido por el radiotelescopio URAN-2.

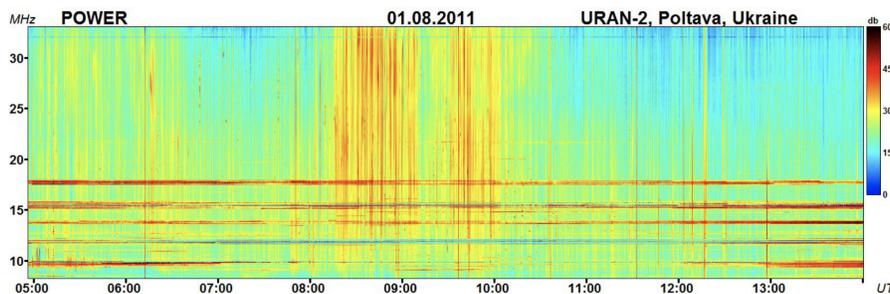


Figura 1.4: Espectro dinámico de emisión en radio del sol entre 8 y 32 MHz. Obtenido de [47].

**Púlsares:** Observaciones a frecuencias entre 10-500 MHz son las mejores para ver los efectos del medio interestelar en la emisión de los púlsares. El perfil de pulso de estos objetos a bajas frecuencias tiene una evolución significativa, además de una ruptura del índice espectral [54]. El ejemplo de un gráfico del perfil de pulso de un púlsar para 4 diferentes frecuencias se muestra en la figura 1.5.

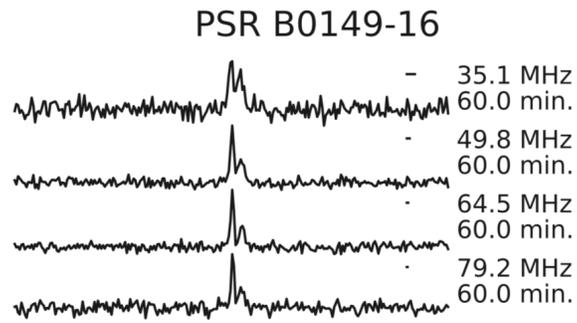


Figura 1.5: Perfil de pulso a 35.1, 49.8, 64.5 y 79.2 MHz del púlsar PSR B0149-16. Obtenido de [54].

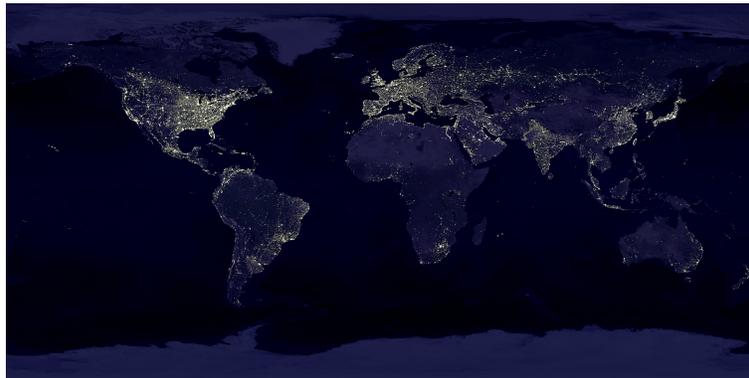


## Capítulo 2

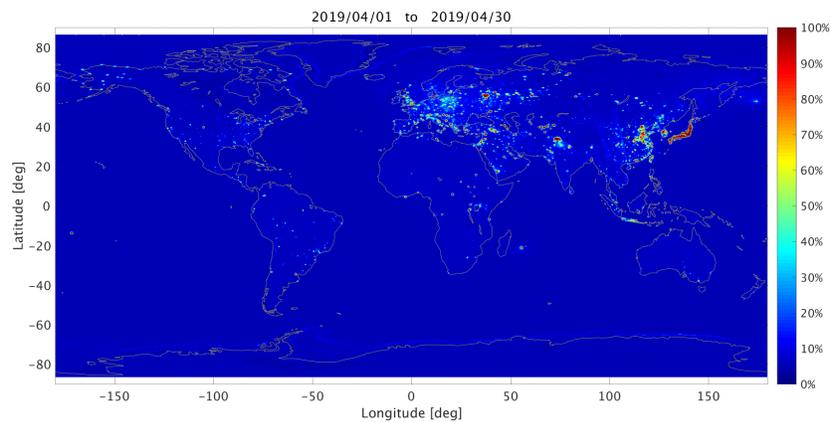
# La RFI en radioastronomía

La radioastronomía comparte el espectro radioeléctrico, que es el canal de transmisión y recepción de información, con dispositivos electrónicos y sistemas de comunicaciones. A diferencia de estos, la radioastronomía recibe información la mayoría del tiempo y transmite muy poco en comparación. Estos sistemas y dispositivos son fuentes de interferencia de radiofrecuencia, RFI. Así el problema de RFI en radioastronomía ha crecido a la par del desarrollo y avance tecnológico, pues cada vez se utiliza un número mayor de bandas de frecuencia del espectro electromagnético donde operan los nuevos dispositivos tecnológicos fuentes de RFI. Los sistemas de telecomunicaciones, por ejemplo, han desarrollado una amplia variedad de servicios que operan sobre un mayor rango de frecuencias.

En términos generales, la RFI es cualquier señal no deseada que entra al sistema receptor de un radiotelescopio y que no proviene de objetos astronómicos [12]. Para la radioastronomía, la interferencia es el equivalente a la contaminación lumínica en astronomía óptica; ambas constituyen un importante problema para las observaciones en las dos ventanas del espectro. El fenómeno de contaminación lumínica afecta las observaciones en el visible debido a que la luz que escapa hacia el cielo se dispersa hacia el haz del telescopio por acción de partículas de polvo que se encuentran en la atmósfera. Para solucionar este problema de contaminación lumínica los astrónomos han tomado diversas alternativas entre las que destacan leyes que regulan el uso de los sistemas de iluminación, la ubicación de los telescopios en sitios alejados de centros urbanos, y el reemplazamiento de focos con los que operan a longitudes de onda menos estorbosas. De igual manera, en radioastronomía se buscan similares soluciones al problema de RFI. Imágenes que ejemplifican estos fenómenos de contaminación lumínica y contaminación por RFI se muestran en la figura 2.1.



(a)



(b)

Figura 2.1: Contaminación lumínica (a) y contaminación por RFI (b). Obtenido de <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/new-night-lights-maps-open-up-possible-real-time-applications> y <https://salinity.oceansciences.org/smap-radiometer.htm>.

Como se menciona al principio de este capítulo, la RFI es originada por sistemas de telecomunicaciones y una multitud de otros dispositivos que operan en el rango de radio del espectro. Dada la gran variedad de objetos que producen RFI, las señales de interferencia presentan una enorme gama de características:

1) De acuerdo a donde es generada la RFI puede ser *interna* o *externa*. La RFI interna es originada en los mismos radio-observatorios. Dispositivos del mismo radiotelescopio y hasta un sistema de monitoreo de RFI de baja calidad son algunos causantes de este tipo de interferencia

---

[40]. RFI externa es cualquiera proveniente de fuera del radio-observatorio.

2) De acuerdo al ancho de banda que ocupa puede ser de *banda ancha*, si emite en un amplio rango de frecuencia, o de *banda angosta* si emite en frecuencias discretas.

3) De acuerdo al tiempo que está presente la interferencia puede ser *intermitente* si emite por periodos de minutos o horas, *permanente* cuando emite constantemente en el tiempo o como *pulsos* si emite periódicamente en breves intervalos de segundos o milisegundos.

4) De acuerdo a la ubicación de la fuente de RFI puede ser *estacionaria*, si se ubica siempre en un mismo punto, o *móvil* si la fuente se encuentra moviéndose en el espacio.

5) Puede ser *intencional*, como una emisora AM/FM, o *no intencional*, como la chispa de una bujía o de un aislador defectuoso en líneas de alta tensión.

6) La RFI también puede estar *polarizada* o *no polarizada*.

7) De acuerdo con su potencia respecto al nivel de ruido del instrumento, la RFI puede ser de *alta potencia* o de *baja potencia*.

Los instrumentos, y sobre todo las técnicas de buscar la RFI dependen de estas características. Por ejemplo, técnicas que sirven para detectar RFI fuerte y permanente pueden ser incapaces de detectar RFI débil e intermitente.

Ejemplos típicos de fuentes de RFI se muestran en la tabla 2.1. La columna 1 muestra la fuente, la columna 2 el rango de frecuencias de emisión, la columna 3 el ancho de banda de la señal de emisión y en la última columna se muestran características de la emisión.

Fuente	Frecuencia	Ancho de banda	Características
GPS <sup>a</sup>	1-2 GHz	2 MHz	banda ancha, polarizada, permanente
TV <sup>b</sup>	475-870 MHz	6 MHz	banda ancha, polarizada, permanente, estacionaria
Radio FM <sup>c</sup>	88-108 MHz	200 kHz	banda angosta, permanente, estacionaria
Radio AM <sup>d</sup>	540 - 1600 kHz	10 kHz	banda angosta, permanente, estacionaria
Teléfono celular <sup>e</sup>	1850 -1990 MHz	4 kHz	banda angosta, móvil
Wi-Fi <sup>f</sup>	5 GHz	40 MHz	estacionario, banda ancha

Tabla 2.1: Ejemplos típicos de fuentes de RFI para la radioastronomía.

<sup>a</sup>[http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/rdet/apuntes/tutorialgps\\_receptor.pdf](http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/rdet/apuntes/tutorialgps_receptor.pdf)

<sup>b</sup>[https://www.crcm.gov.co/recursos\\_user/Documentos\\_CRC\\_2012/Actividades\\_Regulatorias/TDT](https://www.crcm.gov.co/recursos_user/Documentos_CRC_2012/Actividades_Regulatorias/TDT)

<sup>c</sup><http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Audio/radio.html>

<sup>d</sup><http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Audio/radio.html>

<sup>e</sup><http://www.eveliux.com/mx/ancho-de-banda-definicion.html>

<sup>f</sup><https://www.adslzone.net/2018/05/18/ancho-banda-canal-wifi-20-40-80-mhz/>

Ya que no siempre se puede controlar la RFI en su totalidad y que puede aparecer o desaparecer en cualquier momento una fuente de RFI, es necesario monitorear el ambiente electromagnético constantemente y desarrollar sistemas de detección y mitigación de RFI para los radio-observatorios sin importar su ubicación ni frecuencia de observación.

## 2.1. La UIT, su papel y funciones.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, UIT, es el organismo encargado de atribuir el espectro radioeléctrico a escala mundial. Esto es, asignar frecuencias específicas y potencia permitidas para diversos usos y aplicaciones: sistemas de radares, GPS, radiocomunicaciones, radioastronomía, etc. Para esto la UIT ha dividido el mundo en 3 regiones: región 1, región 2 y región 3, donde México pertenece a la región 2 junto con el resto del continente americano. La figura 2.2 muestra la división por regiones hecha por la UIT.

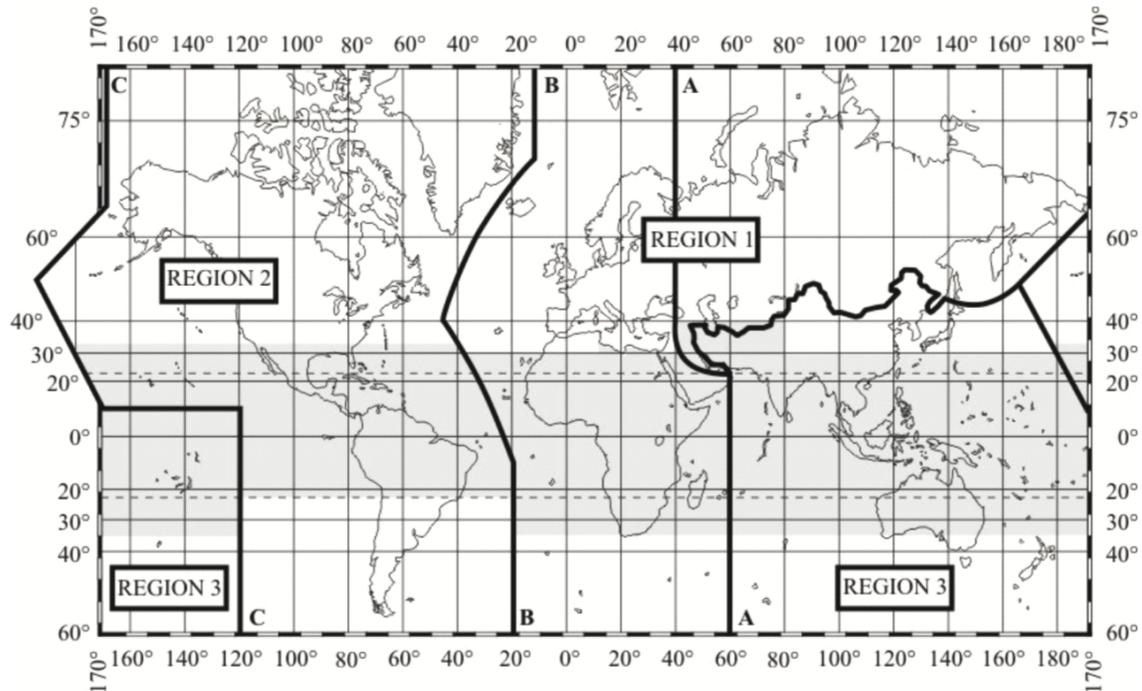


Figura 2.2: Regiones definidas por la UIT. Obtenida de [23].

Para asignar las bandas de uso a diversos servicios se han decretado leyes a nivel local en cada país, además de las establecidas por la UIT, de acuerdo a la situación específica de cada uno. En México, el Instituto Federal de Telecomunicaciones, IFT, es el encargado de controlar el espectro radioeléctrico. Para esto se ha creado el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, CNAF, el cual indica el servicio al que es atribuida una determinada banda de frecuencias. Dentro de éste, se encuentran las bandas asignadas a la radioastronomía, en su mayoría están compartidas con otros servicios (sólo 3 de éstas no son compartidas: bandas de 25.55-25.67, 73.0-74.6 y 608.0-614.0 MHz ) y son por decreto internacional (sólo 2 asignadas por decreto nacional: bandas de 73.0-74.6 y 608.0-614.0 MHz).

Una de las funciones de la UIT es establecer una serie de normas técnicas, llamadas recomendaciones, para la utilización, gestión y uso eficaz del espectro radioeléctrico, aplicables a escala mundial. Estas recomendaciones se hacen de manera individual para cada servicio asignado, entre los que se encuentra la radioastronomía. Para evitar la degeneración de las señales astronómicas por efectos de RFI, la UIT ha desarrollado una serie de recomendaciones de protección entre las que se encuentran: la selección de los sitios para la instalación de radiotelescopios en

lugares que se encuentren en mayor medida libres de señales de interferencia, la promulgación de leyes regulatorias ante organismos gubernamentales locales, remoción de fuentes de RFI, la negociación con usuarios y la aplicación de técnicas de escisión y/o mitigación de RFI, entre otras. El total de recomendaciones emitidas por la UIT para la radioastronomía se puede ver en [29].

Las tablas 2.2 y 2.3 muestran las frecuencias asignadas a la Radioastronomía en MHz y GHz respectivamente. La columna 1 indica la banda de frecuencias, la columna 2 el ancho de banda asignada a dicha frecuencia y la última columna muestra el uso típico en radioastronomía de dicha banda. [30].

Frecuencia (MHz)	$\Delta\nu$ (MHz)	Observaciones en radioastronomía
13.36-13.41	0.120	Sol, Júpiter
25.55-25.67	0.120	Sol, Júpiter
37.5-38.25	0.750	Sol, Júpiter
73-74.6	1.6	Sol, Júpiter, emisión no térmica
322-328.6	6.6	Deuterio ( <i>DI</i> ) y Radiogalaxias
608-614	6	Sol, medio interestelar y púlsares
1400-1427	27	Hidrógeno ( <i>HI</i> )
1610.6-1613.8	3.2	Radical hidroxilo ( <i>OH</i> )
1660-1670	10	Radical hidroxilo ( <i>OH</i> )

Tabla 2.2: Frecuencias en MHz asignadas a radioastronomía.

Las primeras 4 bandas de la tabla 2.2 son importantes para la observación del planeta Júpiter y del Sol. La importancia de estudiar Júpiter reside en que es el único planeta que presenta emisión notable en longitudes decamétricas. Por otro lado, las observaciones del Sol son importantes para entender sus mecanismos de emisión en radio y extenderlo a las demás estrellas.

Varias de las frecuencias en la tabla 2.2 están asignadas por su correspondencia a ciertas

transiciones atómicas o moleculares. La banda entre 322 y 328.6 MHz es ampliamente utilizada para estudiar la estructura de las radio galaxias. Especial importancia tiene para la Cosmología; a los 327.4 MHz se encuentra la línea espectral de la estructura hiperfina del deuterio. La abundancia relativa del deuterio y el hidrógeno está relacionada con cuestiones acerca del origen del universo y la síntesis de los elementos. La banda de 1400-1427 MHz contiene la frecuencia de la línea espectral del hidrógeno atómico neutro, conocida como la línea de 21 cm del hidrógeno. Esta ocurre a 1420.4057 MHz. En las bandas de 1610-1613.8 MHz y 1660-1670 MHz se hacen observaciones del radical  $OH$ .

Frecuencia (GHz)	$\Delta\nu$ (GHz)	Observaciones en radioastronomía
4.8-5.0	0.2	Formaldeido ( $H_2CO$ ) y continuo
10.6-10.7	0.1	Cuásares
15.35-15.4	0.05	Cuásares
22.21-22.5	0.29	Másers de agua y vapor de agua atmosférico
23.6-24	0.4	Amoníaco ( $NH_3$ )
31.3-31.8	0.5	Moléculas orgánicas complejas
42.5-43.5	1	Másers de SiO
76-116	40	Diversas moléculas
123-158.5	35.5	Diversas moléculas
164-167	3	Continuo
241-275	34	Diversas moléculas

Tabla 2.3: Frecuencias en GHz asignadas a radioastronomía.

La tabla 2.3 muestra frecuencias reservadas en el rango de GHz. La banda alrededor de los 5 GHz tiene uno de sus usos más importantes en el estudio de las nubes interestelares de formaldehído a 4829.66 MHz. Esta línea es casi única en la radioastronomía, ya que es detectable en absorción en prácticamente cualquier dirección de fuente de radio continuo. La distribución de las nubes moleculares de formaldehído, cuyas distancias pueden ser determinadas por la absorción, da evidencia de la distribución de la materia interestelar y ayuda al entendimiento de la estructura de la galaxia.

Observaciones de líneas de rotación del estado  $J = 1 \rightarrow 0$  del monóxido de silicio ( $SiO$ ) a 42.519, 42.820, 43.122 y 43.425 GHz dan cuenta de emisión tanto térmica como maser. En las bandas de mayor frecuencia (cientos de GHz) se observa una gran variedad de líneas moleculares, desde simples a complejas [9].

## 2.2. Efectos de RFI en Radioastronomía.

Ya que las señales de interés en radioastronomía suelen ser muchos ordenes de magnitud más débiles que las señales utilizadas por sistemas de telecomunicaciones y otros dispositivos tecnológicos; y a que los radiotelescopios son altamente sensibles debido a su necesidad de detectar señales débiles, la RFI tiene un impacto muy negativo en la calidad y confiabilidad de las observaciones radioastronómicas. Una señal de RFI puede cubrir por completo la señal de una fuente cósmica cuando es demasiado fuerte, o contaminar los datos aún cuando es débil, llevando a los astrónomos a una interpretación errónea en sus resultados.

La UIT a través de la recomendación ITU-R RA.769-2: Criterios de protección para mediciones radioastronómicas, establece un criterio de protección para mediciones en radioastronomía, y valores para un umbral de interferencia para observaciones de líneas y continuo [28].

Siguiendo el desarrollo de [28], se puede estimar el umbral de interferencia perjudicial para observaciones en radio en unidades convenientes de  $dBWm^{-2}Hz^{-1}$  (para más detalle sobre unidades de medida utilizadas en radioastronomía vease sec. 9.1). Partiendo de la ecuación de la sensibilidad para el radiómetro

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{B\tau}}. \quad (2.1)$$

donde  $\Delta P$  es la variación en el nivel de potencia,  $P$  es el nivel de potencia,  $B$  es el ancho de banda y  $\tau$  el tiempo de integración. Y teniendo que

$$P = kTB \quad y \quad \Delta P = k\Delta TB \quad (2.2)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann en J/K y  $T$  la temperatura en K. Sustituyendo 2.2 en

2.1 y reescribiendo para  $\Delta T$  se tiene que la variación de temperatura es

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{\sqrt{B\tau}} \quad [K] \quad (2.3)$$

donde  $T = T_A + T_r$ , siendo  $T$  la temperatura total del sistema, con  $T_A$  la temperatura de antena y  $T_r$  la temperatura del receptor.

Por otro lado la densidad espectral de potencia,  $\Delta P_s$ , se define como

$$\Delta P_s = k\Delta T. \quad (2.4)$$

La UIT define la potencia umbral,  $\Delta P_H$ , como la potencia de interferencia dentro del ancho de banda que introduce un error del 10% en la medición de  $\Delta P_s$ . Se tiene entonces

$$\Delta P_H = 0.1\Delta P_s B. \quad (2.5)$$

Cuando se expresa la interferencia perjudicial como una densidad de flujo de potencia (dfp) llegando a la antena en el ancho de banda total ( $S_H B$ ) se tiene

$$S_H B = \Delta P_H + 20\log(B) - 158.5. \quad (2.6)$$

Finalmente expresando la interferencia como una dfp espectral ( $S_H$ ) se obtiene

$$S_H = S_H B - 10\log(B). \quad (2.7)$$

donde esta dfp espectral está expresada en unidades de  $dBW m^{-2} Hz^{-1}$ .

La tabla 2.4 y el gráfico 2.3 muestran los niveles de umbral perjudiciales calculados con la ec. 2.7 para observaciones de líneas y de continuo dados por la UIT. Como referencia, 1 Jy, la unidad de densidad de flujo usada en radioastronomía, que tiene un valor de  $10^{-26} W m^{-2} Hz^{-1}$ , en estas unidades es de  $-260 dBW m^{-2} Hz^{-1}$ .

Para la tabla 2.4 y gráfico 2.3 las cuentas están hechas para un tiempo de integración de 2000 segundos y una ganancia de antena de 0 dBi específicamente. Como consecuencia, hay que

ajustar estos valores para distintos tiempos de integración u observaciones con otras antenas. Estos ajustes se describen en secciones 1.2 y 1.3 de [28].

Es de aclarar que los valores de umbral de RFI dados tienen un origen legal. Aunque la definición legal tiene como su base un error en la medición de 10 %, en la práctica, radioastrónomos quisieran tener mediciones más precisas. Por lo tanto, es deseable que el nivel de interferencia sea sustancialmente menor que el nivel establecido por la UIT.

Observaciones de continuo	
Frecuencia de observación (MHz)	Nivel de interferencia ( $dBWm^{-2}Hz^{-1}$ )
325.3	-248
25.610	-249
73.8	-258
151.525	-259
325.3	-258
408.05	-255
611	-253
1413.5	-255
1665	-251
2695	-247
4995	-241
10650	-240
15375	-233
22355	-231
23800	-233
31550	-228
43000	-227
89000	-228
150000	-223
224000	-218
270000	-216

Observaciones de líneas	
Frecuencia de observación (MHz)	Nivel de interferencia ( $dBWm^2Hz^{-1}$ )
327	-244
1420	-239
1612	-238
4830	-237
14488	-230
22200	-221
23700	-216
43000	-215
48000	-210
88600	-209
150000	-208
220000	-199
265000	-197

Tabla 2.4: Umbral de interferencia para observaciones de continuo (izquierda) y de líneas (derecha), según la recomendación ITU-R RA.769-2 dada por la UIT.

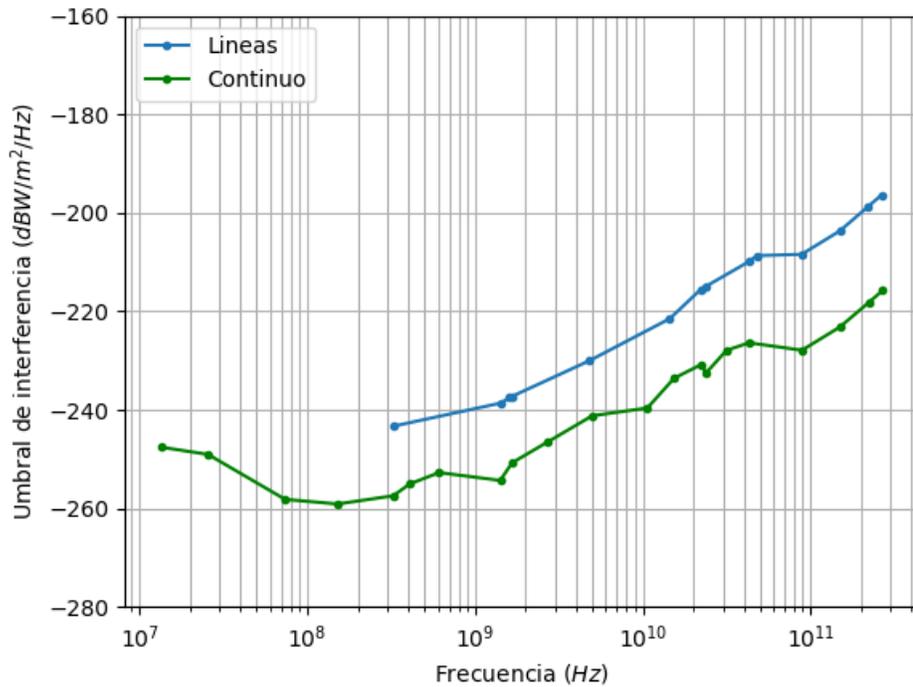


Figura 2.3: Umbral de interferencia para observaciones de continuo y líneas, según la recomendación ITU-R RA.769-2 dada por la UIT.

## 2.3. Métodos de mitigación de RFI.

Esta sección aborda de manera general algunos de los métodos de mitigación que se utilizan para tratar la RFI en radioastronomía, sin profundizar en detalle de estos. Para una mayor explicación de los distintos métodos de mitigación y/o escisión vease las referencias [3,11,20,34].

Cuando se habla de mitigación de RFI se busca reducir el efecto sobre las observaciones de radioastronomía producido por la RFI presente en los datos. Existen diversos métodos de mitigación de RFI, sin embargo no existe un método universal, ya que estos dependen de distintos factores: el radiotelescopio utilizado, la observación realizada y las características de la RFI presente. [20].

- 1) El **tipo de radiotelescopio**. Si se trata de un sólo plato, un interferómetro o inter-

ferometría de larga línea de base (VLBI). Los radiotelescopios de un sólo plato son los más vulnerables porque toda la RFI entra coherentemente al sistema, por dispersión o reflexión. Los interferómetros son menos vulnerables porque la tasa de franjas para la RFI sería muy distinta a la del astro siendo observado. Sin embargo, aún para arreglos individuales, las antenas sufren efectos de RFI. Observaciones de VLBI son aún más robustas a la presencia de RFI, ya que las señales de RFI prácticamente no están correlacionadas en las diferentes estaciones.

2) El **tipo de observación**. Si lo que se observa es continuo o líneas espectrales.

3) El **tipo de RFI**. Dependiendo las características que tiene en particular la fuente de interferencia: banda ancha o angosta; si es intermitente, permante o como brotes; estacionaria o movil; si está polarizada.

Una clasificación general de las estrategias de mitigación de RFI divide los métodos en proactivos y reactivos, y una subclasificación de estos últimos, de acuerdo a su etapa de aplicación en pre-detección, pre-correlación y post-correlación. [3]. Una clasificación similar se puede encontrar en [34].

### 1) Métodos proactivos.

Estos métodos incluyen entre otros la localización de los radio-observatorios en zonas donde los niveles de interferencia son mínimos, llamados zonas de radio silenciosas (RQZ), y usar bandas de frecuencias protegidas para realizar radio-observaciones. Tanto la protección de las RQZ como la asignación de bandas de frecuencia son asignadas por la UIT y/o por las autoridades locales en cada país. En México, por ejemplo, el IFT ha asignado la banda de frecuencias de 70-350 GHz para la operación del Gran Telescopio Milimétrico (GTM); además se ha decretado una zona silenciosa de 100 km de radio alrededor del GTM, donde no se permite la operación de ningún otro sistema de radiocomunicación [2]. La figura 2.4 muestra el mapa de la zona silenciosa para el GTM.



a través de un umbral. El blanking temporal esencialmente se refiere a la interrupción de la entrada y/o salida del correlador durante las duraciones de recepción de RFI fuertes.

- Métodos **post-correlación** son aplicados a buffers de datos o datos integrados para un procesamiento fuera de línea, de manera que el tratamiento de RFI se realice antes o después de la creación de imágenes. La aplicación de estas técnicas tiene el objetivo de minimizar la pérdida de datos por presencia de RFI. Ejemplos de técnicas post-correlación son filtrado digital de señales, que se hace fuera del rango de frecuencia del receptor, y técnicas que utilizan un umbral para marcar señales de RFI en los datos.

## 2.4. Ejemplos numéricos.

En esta sección se obtendrá la densidad de potencia de algunas fuentes comunes que generan RFI, para hacer una comparación de la potencia que generan éstas con la obtenida de un objeto astronómico de interés para la radioastronomía.

Ya que la densidad de flujo espectral de un objeto astronómico que se recibe en la tierra es muy pequeña, se creó la unidad llamada Jansky (Jy), definida como la cantidad de energía por unidad de tiempo por unidad de área por unidad de ancho de banda, cuyo valor es  $10^{-26} \frac{W}{m^2 \cdot Hz}$ . En radioastronomía, la densidad de flujo de un objeto astronómico va desde unos cuantos  $\mu\text{Jy}$  para los más débiles hasta unos cuantos miles de Jy para los más fuertes.

Dada esta situación, es apropiado medir la potencia recibida en unidades más convenientes, los decibeles (vease sec. 9.1 ). Se tiene entonces que la densidad de flujo en unidades de dB relativos a miliwatts para 1 Jy es igual a -230 dBm, para 1 mJy es -260 dBm y para 1  $\mu\text{Jy}$  es -290 dBm.

Tomando esto en cuenta, podemos hacer una buena comparación entre la potencia medida de un objeto astronómico y la de algunos dispositivos electrónicos cotidianos fuentes de RFI, usando la ecuación 9.5 y a partir de la ecuación para la densidad de flujo

$$S_\nu = \frac{P}{4\pi r^2 B} \quad (2.8)$$

donde  $P$  es la potencia de emisión,  $r$  la distancia y  $B$  el ancho de banda.

Suponiendo un celular que está a 1 km del telescopio, y usando valores típicos para su potencia y ancho de banda de 200 mW y 4 kHz respectivamente, obtenemos

$$S_\nu = \frac{0.2W}{(4\pi)(10^3m)^2(4 \times 10^3Hz)} = 4 \times 10^{-12} \frac{W}{m^2Hz} = 4 \times 10^{14} \text{ Jy} \quad (2.9)$$

Esta densidad de flujo es aproximadamente mil millones de veces más fuerte que los astros más brillantes.

Si el celular estuviera sobre la superficie de la luna, a 384 mil km de la tierra, su densidad de flujo sería  $2.7 \times 10^{-23} \frac{W}{m^2Hz}$  o 2.7 kJy. Usando la ec. 9.5 para expresar esto en dBm, obtenemos

$$S_\nu = 10 \log(2.7 \times 10^{-20}) = -196 \text{ dBm} \quad (2.10)$$

Es decir, aún en la luna, un celular sería igual de brillante a los astros más poderosos en radio-ondas.

Para un aparato común como un horno de microondas de uso doméstico, muchas veces presente en los radio-observatorios, a 30 m de distancia sería de  $7 \times 10^{17}$  Jy ó -52 dBm. Un router de wifi a 100 mts da una densidad de potencia de  $9.9 \times 10^{11}$  Jy ó -110 dBm. La densidad de flujo de una antena repetidora de una estación FM a 5 Km de distancia sería de  $2.3 \times 10^{16}$  Jy ó -66 dBm. La tabla 2.5 muestra los valores típicos utilizados para potencia (col. 2) y ancho de banda (col. 3), la distancia tomada (col. 4) y la densidad de flujo esperada (col. 5 y 6) de estos ejemplos.

Se puede ver entonces que el nivel de potencia de dispositivos de radio y telecomunicaciones comunes rebasa por mucho el de cualquier objeto astronómico de interés. Un celular común a la distancia del radio de la orbita lunar alrededor de la tierra tendría una densidad de flujo comparable con los más potentes emisores astronómicos.

Fuente	P (W)	BW (kHz)	Distancia (m)	$S_\nu$ (Jy)	$S_\nu$ (dBm)
Celular <sup>a</sup>	$200 \times 10^{-3}$	4	$1 \times 10^3$	$3.9 \times 10^{14}$	-84
Horno de microondas <sup>b</sup>	$1 \times 10^3$	10,000	30	$7 \times 10^{17}$	-51.5
Wi-Fi <sup>c</sup>	$50 \times 10^{-3}$	40,000	100	$9.9 \times 10^{11}$	-110
Radio FM <sup>d</sup>	$15 \times 10^3$	200	$5 \times 10^3$	$2.38 \times 10^{16}$	-66.2

Tabla 2.5: Características típicas de aparatos comunes y su densidad de flujo medido en Jy y dBm.

<sup>a</sup><http://www.eveliux.com/mx/ancho-de-banda-definicion.html>

<sup>b</sup><https://www.explainthatstuff.com/microwaveovens.html>

<sup>c</sup><https://www.adslzone.net/2018/05/18/ancho-banda-canal-wifi-20-40-80-mhz/>

<sup>d</sup><http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Audio/radio.html>

## Capítulo 3

# Instrumentación para la detección de RFI

El capítulo anterior aborda la problemática que representa la RFI en radioastronomía, que implica la necesaria detección, identificación y monitoreo de esta RFI. Actualmente todos los radiotelescopios en el mundo tienen un sistema de monitoreo de RFI, de acuerdo a sus necesidades específicas. Estos sistemas generalmente tienen un mismo diseño: las señales de RFI se captan por medio de una antena y después son tratadas por medios analógicos o digitales. Las siguientes secciones abordan estos elementos de los sistemas de detección de RFI.

### 3.1. Antenas y parámetros de antenas

La antena es el primer elemento en un sistema de detección de RFI. Definida como el dispositivo diseñado para emitir o recibir ondas electromagnéticas, es en ésta donde las señales son captadas para ser llevadas a un sistema donde se pueden estudiar.

Existen diferentes clasificaciones de antenas de acuerdo a alguno de los parámetros de antenas que las caracterizan. Estos parámetros son: el patrón de radiación, la directividad, la ganancia, la apertura efectiva, la polarización, la impedancia y el ancho de banda.

El **patrón de radiación** de la antena es la variación angular de las propiedades de su radiación como función de las coordenadas espaciales. El patrón de radiación de una antena transmisora, por el teorema de reciprocidad, es equivalente al patrón cuando actúa como receptora, en cuyo caso representa la sensibilidad que tiene la antena para recibir señales elec-

tromagnéticas en una cierta dirección.

En el diagrama de radiación se pueden identificar distintos componentes: lóbulos, que son direcciones de radiación, y nulos, que son las direcciones donde la radiación es nula. Los lóbulos a su vez se clasifican en lóbulo principal, lóbulos laterales y lóbulo posterior. La figura 3.1 da un ejemplo de esto.

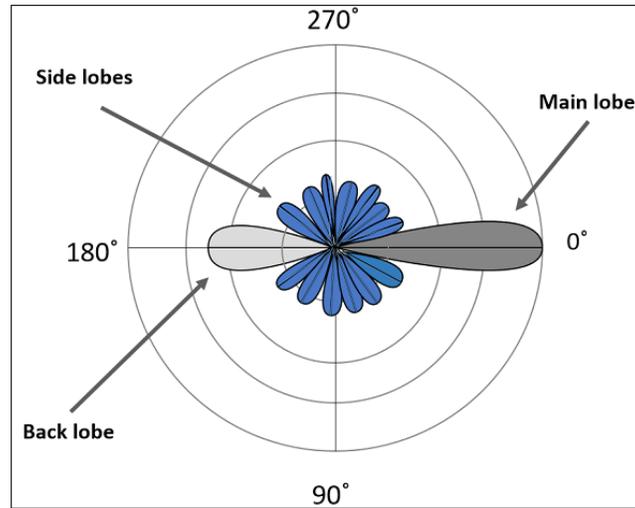


Figura 3.1: Patrón de radiación de una antena. Obtenido de [https://www.tutorialspoint.com/antenna\\_theory/antenna\\_theory\\_radiation\\_pattern.htm](https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_radiation_pattern.htm)

La **directividad** de una antena expresa cuanta potencia es capaz de concentrar preferentemente en una dirección e inhibirla en las demás direcciones.

Se define la **Ganancia** de una antena como la fracción de potencia incidente que se pierde por disipación.

La **apertura efectiva** se refiere al área colectora de la antena. La antena colectara más potencia de una onda conforme su apertura efectiva sea mayor también. La apertura efectiva para una antena se expresa como

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (3.1)$$

donde  $G$  es la ganancia de la antena.

La **polarización** de la antena se define como la polarización de la onda transmitida o recibida por la antena. Una antena con una polarización dada no puede transmitir o recibir ondas con otra polarización. Una antena, igual que una onda electromagnética, puede tener polarización circular (izquierda o derecha), elíptica (izquierda o derecha) o lineal (horizontal o vertical).

**Impedancia** esta definida como la relación entre el voltaje y la corriente en las terminales de la antena. De esta impedancia se busca que coincida con la de la línea de transmisión de conexión, para evitar reflexiones de potencia en el punto de interconexión.

Finalmente, el **ancho de banda** es el rango de frecuencias dentro del cual el rendimiento de la antena con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar especificado.

Una clasificación de las antenas que se hace de acuerdo a la forma de su patrón radiación y la dirección que ésta toma tiene 3 tipos de antenas:

1) Antena isotropica. Es una antena cuya radiación de potencia se transmite de forma uniforme en todas las direcciones, por lo que su patrón de radiación es una esfera. Este tipo de antena es un radiador ideal que no existe en la realidad, pero su patrón de radiación, ganancia y directividad son usadas como escala de comparación en el estudio de otras antenas.

2) Antena omni-direccional. Es aquella antena que radía en todas las direcciones de un plano con una distribución relativamente uniforme.

3) Antena direccional. Es una antena que irradia en una dirección específica, inhibiendo lo mayor posible la cantidad de radiación en las otras direcciones.

Esta clasificación es útil cuando se pretende hacer estudios de RFI para determinar la o las antenas que se utilizarán, ya que establecer la ubicación de una fuente que produce RFI puede ser de gran ayuda para mitigar sus efectos, y una antena direccional es una óptima para ello. El patrón de radiación para los 3 tipos de antenas descritos se muestra en la figura 3.2.

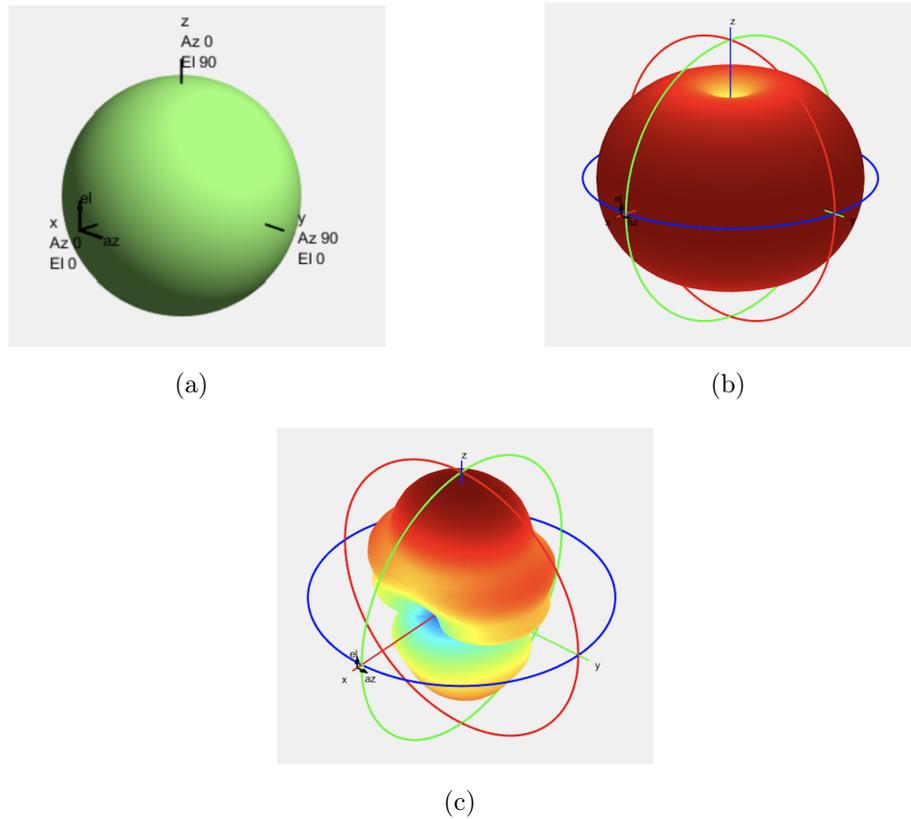


Figura 3.2: Patrón de radiación de **a)** antena isotrópica. **b)** antena omni-direccional **c)** antena direccional.

Un ejemplo típico de antena omni-direccional en el espacio libre es la antena dipolo. El dipolo consta de una línea de transmisión cortada por la mitad, donde es alimentada, formando así 2 elementos idénticos. Generalmente la longitud del dipolo puede ser de  $1/2$  de la longitud de la onda que se desea recibir o transmitir, pero actualmente puede ser de cualquier longitud.

La antena dipolo es la forma más fundamental de una antena y de la que se parte para construir antenas con formas más complejas. Existe también una variedad de antenas dipolo, entre las que se encuentran el dipolo doblado, dipolo de brazos plegados o el dipolo en V invertida. La figura 3.3 muestra la antena dipolo simple y su patrón de radiación.

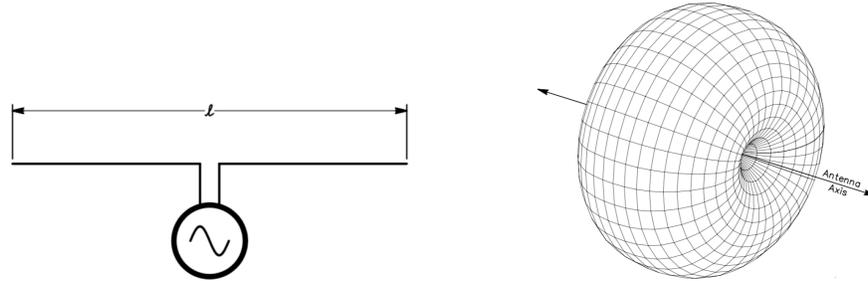


Figura 3.3: Antena dipolo simple (izquierda) y su patrón de radiación (derecha). Obtenido de [10].

Una antena LPDA (Log Periodic Dipole Array) es un ejemplo de antena direccional. Consiste de un conjunto de elementos dipolo lineales separados entre sí cuya longitud varía de acuerdo al rango de frecuencia de diseño, así el elemento más largo es de  $1/2\lambda$  de la máxima longitud de onda de diseño y el elemento más corto es de  $1/2\lambda$  de la mínima longitud de onda de diseño. La figura 3.4 muestra la antena LPDA y sus componentes básicos.

Dos características notables de la LPDA son su direccionalidad y su ancho de banda. Su direccionalidad es debido a la configuración de sus elementos, y su amplio ancho de banda debido a la combinación logarítmica de las longitudes de los elementos. Estas dos características la hacen útil en barridos para RFI, ya que se puede determinar la dirección de la fuente que produce RFI y tiene la capacidad de cubrir un amplio rango de frecuencias donde se busca señales de interferencia.

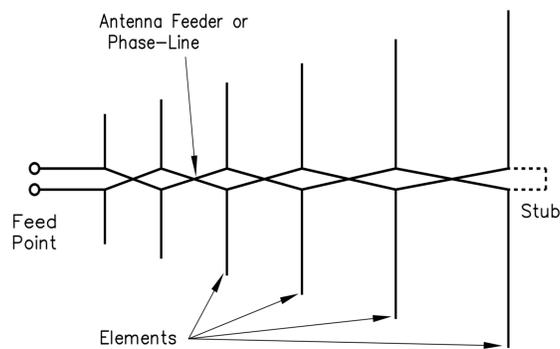


Figura 3.4: Antena LPDA y sus componentes básicos. Obtenido de [10].

### 3.2. Analizadores de espectros.

Una vez la antena capta la señal, debe ser estudiada a través de algún instrumento especial para ello. Uno que resulta ser muy útil es el analizador de espectros.

Un analizador de espectros es un dispositivo que mide la potencia de una señal en función de su frecuencia. Existen 2 tipos de analizadores de espectros en función del método que usan para obtener el espectro de la señal: analizadores de espectros por barrido y analizadores de espectros por Transformada de Fourier. Para una descripción especializada sobre los analizadores de espectros y su funcionamiento vease [59].

El **analizador de espectros por barrido** (también llamado analizador de espectros analógico) trabaja, en términos generales, con un receptor superheterodino, pasando la señal a la entrada a una frecuencia intermedia, IF, y barriendo con un oscilador local en un rango de frecuencias. La figura 3.5 (a) muestra el diagrama de bloques para un analizador de este tipo.

El **analizador de espectros por Transformada de Fourier** (también llamado analizador de espectros digital) utiliza un microprocesador que realiza la transformada de Fourier mediante un algoritmo matemático (llamado Transformada Rápida de Fourier, FFT) para determinar el espectro de la señal entrante. Además, utiliza un circuito de muestreo y un convertidor analógico-digital. La figura 3.5 (b) muestra el diagrama de bloques para un analizador de este tipo.

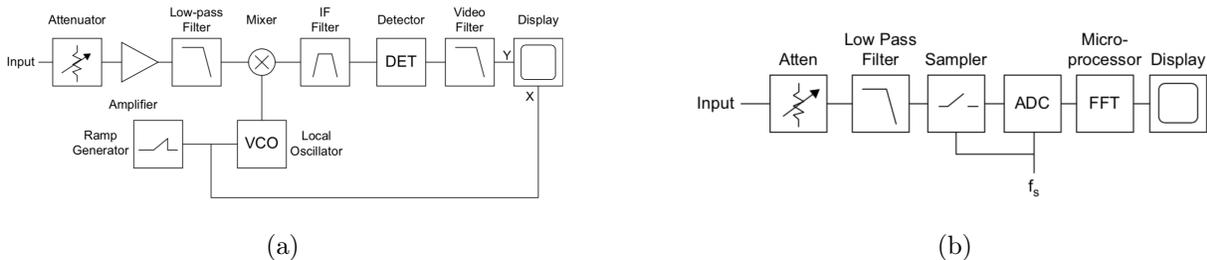


Figura 3.5: Diagrama de bloques de un analizador de espectros por barrido (a) y un analizador de espectros por Transformada de Fourier (b). Obtenido de [59].

Una diferencia sustancial entre los dos estilos es que el analógico, por su naturaleza, no capta todo el espectro a la vez, el proceso de ir barriendo en frecuencia tarda un cierto tiempo

en suceder. En contraste, para el digital, todo el espectro es captado en un solo golpe. Esta diferencia puede tener implicaciones importantes si el barrido es lento, y sobre todo en la presencia de RFI en forma de pulsos.

Ambos tipos de analizadores tienen en común parámetros gobernados por la teoría del análisis espectral, que determinan las características del espectro de las señales que reciben. Los siguientes párrafos describen estos parámetros.

- **Ruido**

El ruido existe de forma inherente a todos los instrumentos de medición, como los analizadores de espectros, generado por la propia temperatura de los elementos del sistema. El ruido representa un papel de más importancia a la hora de optimizar la medición de las señales, de éste se desprende una serie de parámetros que caracterizan al analizador:

La **relación señal a ruido** se define justamente como la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido, y se expresa como

$$SNR = P_s/P_n. \quad (3.2)$$

Donde  $P_s$  y  $P_n$  son la potencia de la señal y del ruido respectivamente.

Se define el **factor de ruido** como la razón de la relación señal a ruido a la entrada y la relación señal a ruido a la salida, expresado como

$$F = \frac{S_1/N_1}{S_2/N_2} \quad (3.3)$$

donde  $F$  es el factor de ruido y  $S_1/N_1$  y  $S_2/N_2$  son la relación señal a ruido a la entrada y salida respectivamente.

Se tiene entonces que la **figura de ruido** en unidades de dB, está dada como

$$NF = 10\log(F) \quad (3.4)$$

El **nivel de ruido promedio mostrado, DANL**, es la amplitud del piso de ruido dentro de un rango de frecuencia dado. La sensibilidad del analizador es determinada por el DANL, ya que éste no puede medir ninguna señal por debajo de dicho nivel.

- **Ancho de banda de resolución**

El ancho de banda de resolución, RBW, es la resolución en frecuencia del analizador, determinada por el ancho de banda del filtro IF. Se tiene entonces que a menor RBW, mayor será la resolución en frecuencia. Esto es, una resolución mayor permite ver con mayor detalle una señal o, por ejemplo, poder diferenciar entre dos señales cuya separación es mínima, que una mala resolución mostraría como una única señal.

Un efecto de aumentar la resolución espectral, es decir, elegir un RBW menor, es la disminución del nivel de ruido promedio medido, así como de la potencia de las señales. Ya que la RBW está dada por el ancho de banda del filtro IF del analizador, cuando se selecciona un filtro más estrecho, una menor cantidad de ruido entra al detector, bajando así el nivel del ruido promedio.

- **Ancho de banda de video**

El ancho de banda de video, VBW, tiene como propósito suavizar la traza y disminuir el ruido. Matemáticamente se quitan las altas frecuencias dando un resultado semejante a un promedio. Un VBW grande deja más altas frecuencias, que aparecen como ruido en la traza. Así, tener un VBW pequeño permite ver señales que podrían estar eclipsadas por el ruido, que un VBW grande no permitiría ver. Cambios en VBW no afectan ni la resolución espectral ni el nivel de piso de ruido, como es el caso de la RBW.

- **Tiempo de barrido**

Se define el tiempo de barrido, ST (sweep time), como el tiempo que tarda el analizador en barrer el rango de frecuencias mostrado en pantalla, llamado *span*.

La RBW, el VBW y el ST tienen una relación directa. La posibilidad de usar una mayor resolución espectral o de vídeo implica un incremento en el tiempo de barrido de la señal. Estas variables están relacionadas como

$$ST = \frac{k \cdot span}{RBW \cdot VBW} \quad (3.5)$$

donde  $k$  es un factor de proporcionalidad. Cuando el  $VBW$  se elige al mismo valor del  $RBW$  el tiempo de barrido se puede expresar como

$$ST = \frac{k \cdot Span}{RBW^2} \quad (3.6)$$

La ec. 3.6, permite ver que el tiempo de barrido tiene una dependencia directa con el  $span$  y una relación inversa con el cuadrado de la  $RBW$ , un aumento en la  $RBW$  por un factor de 10 implica un aumento en el  $ST$  por un factor de 100.

Todos estos parámetros tienen una importante relevancia para realizar estudios de RFI. Un nivel de ruido alto no permitirá ver RFI débil, o un  $ST$  grande no permite ver RFI en forma de pulsos, un  $VBW$  grande puede esconder RFI débil y una  $RBW$  apropiada permitirá distinguir señales muy proximas entre si. Se debe tener cada uno de estos factores presente al momento de realizar un análisis espectral.

### 3.3. Teoría del procesamiento digital de señales

El proceso que realiza un analizador de señales digital a través de la Transformada de Fourier se hace mediante el procesamiento digital de señales. En esta sección se describen los procesos bajo los cuales una señal analógica, la que entra directamente al sistema receptor de una antena, es convertida en una señal digital, y sobre 2 problemas consecuentes de digitalizar una señal, el llamado *aliasing* y la generación de *réplicas espectrales*.

#### 3.3.1. Digitalización de una señal.

La digitalización de una señal analógica consiste precisamente en volver digital dicha señal. Este proceso se lleva a cabo por los convertidores analógico-digital, ADC, (elementos de hardware en los sistemas para tratamiento de señales) y consta de 3 etapas: el *muestreo*, que consiste en tomar muestras discretas de una señal continua; la *cuantificación*, que asigna un valor digital a cada muestra tomada; y la *codificación* que consiste en representar los valores discretos en una secuencia numérica. [46].

### ■ Muestreo

Este proceso se realiza tomando muestras en instantes de tiempo discretos de una señal continua en el tiempo, convirtiendola así en una señal discreta (en el tiempo también). Matemáticamente se puede expresar el proceso de muestreo como

$$x(n) = x_a(nt_s) \quad (3.7)$$

Donde  $x(n)$  es la señal discreta,  $x_a$  es la señal analógica,  $t_s$  el periodo de muestreo, y  $n$  el índice de muestreo. Al inverso del periodo de muestreo se le llama frecuencia de muestreo:

$$f_s = 1/t_s. \quad (3.8)$$

Reconstruir la señal analógica sin error, por pérdida de información, es de suma importancia, y la frecuencia de muestreo es un factor determinante para este fin. Para determinar la frecuencia de muestreo adecuada es necesario conocer una característica específica de la señal de interés: la frecuencia máxima de dicha señal. Es el teorema de muestreo de Nyquist el que establece esta frecuencia de muestreo, conocida la frecuencia máxima de la señal. El teorema establece que *la frecuencia de muestreo de una señal analógica debe ser de al menos el doble de la frecuencia más alta que se quiere reconstruir*, esto es

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (3.9)$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo y  $f_{max}$  la frecuencia más alta de la señal. Esta relación es conocida como el *Criterio de Nyquist*.

La figura 3.7 ejemplifica el muestreo de una señal continua.

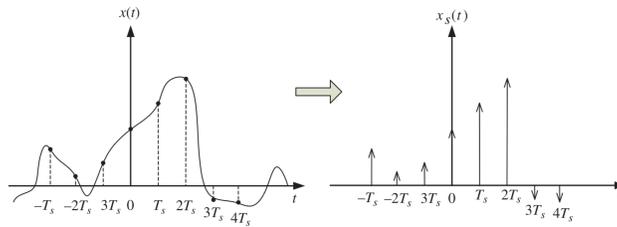


Figura 3.6: Muestreo de una señal continua, obtenida de [33].

- **Cuantificación.**

Una vez muestreada la señal, el siguiente proceso es asignar un valor de amplitud a cada muestra. Esto se hace cuantificando con bits dicho valor, asignándole niveles previamente fijados. Cuando una muestra no alcanza un valor, se le asigna el valor inferior inmediato.

La resolución del ADC depende del número de bits porque un número binario, de  $n$  bits, puede asumir  $2^n$  valores distintos. Por ejemplo, con 3 bits, se puede representar 8 valores, desde 000 hasta 111. En aplicaciones comunes, los ADCs suelen tener 12 ó 14 bits, lo cual implica 4,096 ó 16,384 niveles. Si el rango de voltaje analógico para digitalizar fuera de 0 a 10 voltios, por ejemplo, un ADC de 12 bits dividirá este rango en 4,096 pasos de

$$\frac{10 \text{ V}}{4096 \text{ pasos}} = 2.44 \text{ mV por paso}$$

El tamaño del incremento es una indicación de la precisión con la cual se puede cuantificar la señal; osea, con mayor número de bits, se disminuye el error de cuantificación.

Cabe mencionar que para muchas aplicaciones en la radioastronomía, basta con 3 ó 4 bits para representar la señal. Sin embargo, esto tiene implicaciones para el rango dinámico de las señales muestreadas, y por lo tanto, pueden ser ventajoso usar 8 ó 12 bits, sobre todo si existe la posibilidad de RFI fuerte.

Al número de bits que tiene un ADC se le llama resolución, y se tiene que una mayor cantidad de bits resulta en una mayor (mejor) resolución, ya que un mayor número de bits permite un mayor número de niveles de cuantificación, y por lo tanto, permite una reproducción más fina de la señal original.

- **Codificación.**

La codificación de la señal es el proceso mediante el cual se asigna a cada nivel de cuantificación un número, generalmente binario, dependiendo el código de codificación utilizado. Esta codificación no afecta el contenido informático de la señal digital. Se escoge el sistema de codificación de acuerdo a los requerimientos computacionales del sistema.

### 3.3.2. Aliasing y réplicas espectrales.

El aliasing es un efecto causado por utilizar una frecuencia de muestreo diferente a la establecida por el teorema de Nyquist, provocando que diferentes señales continuas sean indistinguibles cuando se digitalizan.

Considérese una señal senoidal de la forma  $x(t) = \text{Sen}(2\pi f_0 t)$ . Muestreando a una frecuencia  $f_s$  o un periodo  $t_s$ , tenemos que la  $n$ -ésima muestra tiene el valor

$$x_n(t) = \text{Sen}(2\pi f_0 n t_s). \quad (3.10)$$

Ya que para una señal senoidal, dos valores separados por un múltiplo entero de  $2\pi$  son idénticos, esto es,  $\text{Sen}(\phi) = \text{sen}(\phi + 2\pi m)$ , con  $m$  cualquier entero, se tiene que

$$x_n(t) = \text{Sen}(2\pi f_0 n t_s + 2\pi m) = \text{Sen}\left(2\pi\left(f_0 + \frac{m}{n t_s}\right) n t_s\right). \quad (3.11)$$

Si  $m$  es un múltiplo entero de  $n$ , entonces se tiene que  $m = kn$ , y podemos sustituir  $k$  en la ec. 3.10, obteniendo

$$x_n(t) = \text{Sen}\left(2\pi\left(f_0 + \frac{k}{t_s}\right) n t_s\right). \quad (3.12)$$

Dado que  $f_s = 1/t_s$ , podemos escribir esto como

$$x_n(t) = \text{Sen}(2\pi(f_0 + k f_s) n t_s) \quad (3.13)$$

La equivalencia entre la ec. 3.13 y la ec. 3.10 demuestra que señales con frecuencia  $f_0$  y  $(f_0 + k f_s)$ , con  $k$  cualquier entero positivo o negativo, no son distinguibles al muestrearlas a la tasa de muestreo  $f_s$ .

La imagen 3.7 ilustra un caso de aliasing donde dos señales con distintas frecuencias resultan indistinguibles bajo la misma frecuencia de muestreo.

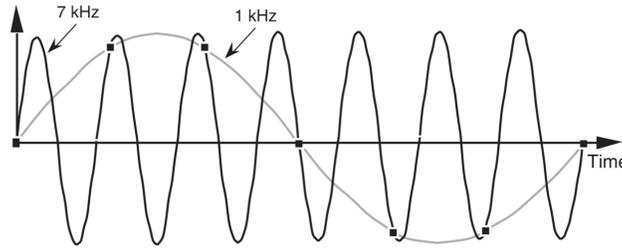


Figura 3.7: Ejemplo de aliasing. Obtenida de [35].

Lo relevante para este trabajo es que si se pretende desarrollar un sistema de monitoreo de RFI que cubre de 0 hasta  $f_{max}$  MHz, se debe muestrear a una frecuencia igual o mayor a  $2f_{max}$ .

Una segunda consecuencia de la ecuación 3.13 es que el espectro de cualquier serie de valores muestreados contendrá repeticiones periódicas del espectro continuo original. Esto nuevamente es debido a que el factor  $k$  puede ser cualquier entero positivo o negativo. La figura 3.8 muestra este efecto de réplicas, donde la señal de interés está sombreada y alrededor de 0, y las réplicas están centradas en 1, 2 y 3 veces la frecuencia de muestreo.

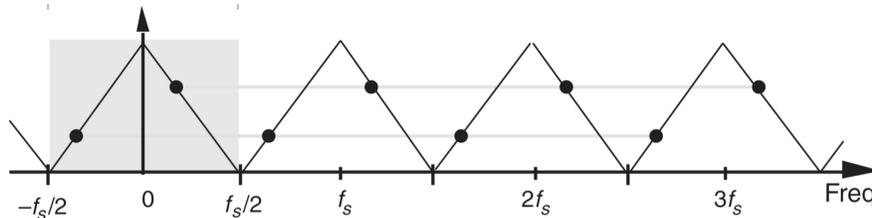


Figura 3.8: Ejemplo de réplicas espectrales. Obtenida de [35].

La separación entre las réplicas dependerá de la frecuencia de muestreo utilizada: cuando es mucho menor a lo que establece el criterio de Nyquist, se produce un solapamiento de las réplicas ocasionando además un aliasing, como se muestra en la figura 3.9.

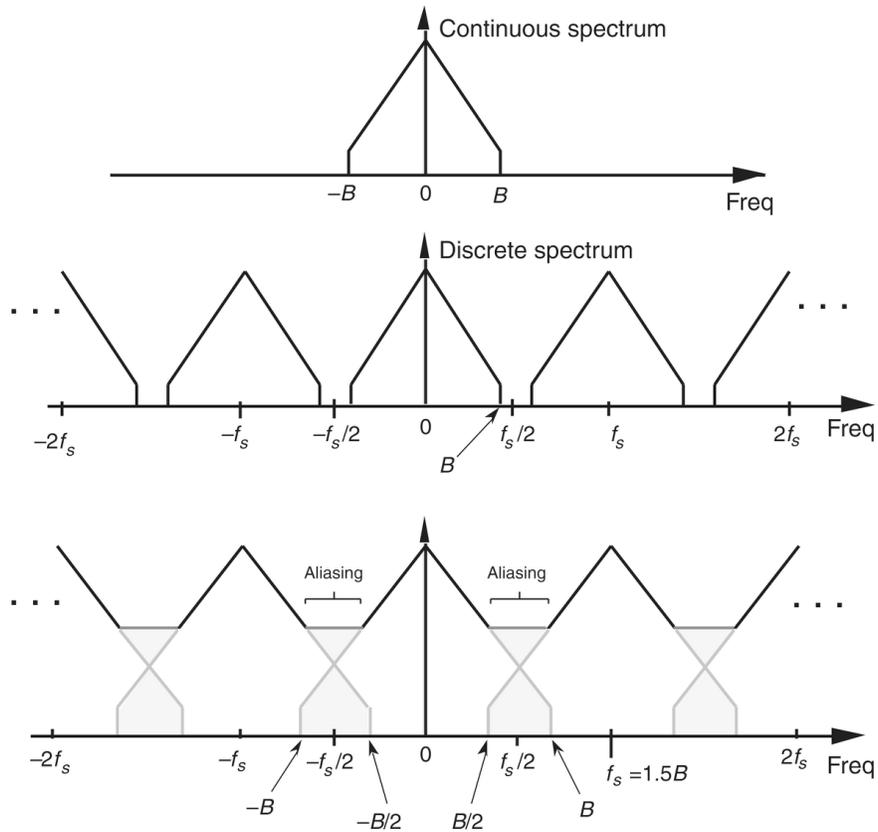


Figura 3.9: Ejemplo de réplicas espectrales y aliasing. Obtenida de [35].

Sin embargo, existe una forma de sacar provecho a la generación de estas réplicas, el *muestreo pasabandas*. Se trata de una técnica de muestreo que se aplica cuando la frecuencia central de la señal que se digitaliza está centrada en una frecuencia distinta a 0 Hz, es decir, no está en banda base. El muestreo pasa bandas aprovecha la generación de las replicas espectrales que implica la ecuación 3.13 para muestrear a una frecuencia menor a la del criterio de Nyquist.

Para explicar esto la figura 3.10 es de buena ayuda. Sea la señal de interés centrada en una frecuencia  $f_c$ , con ancho de banda  $B$ , muestreada a una frecuencia  $f_{st}$ .

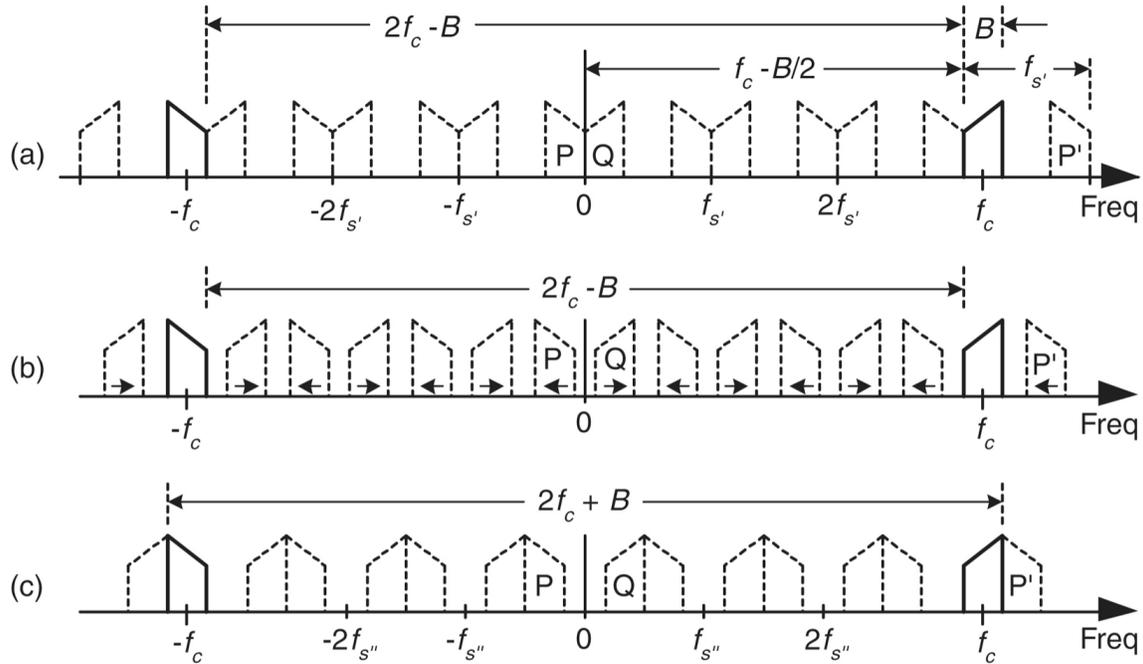


Figura 3.10: Muestreo pasa bandas. Obtenida de [35].

Si se tiene un número de repeticiones del espectro,  $m$ , en el rango  $2f_c - B$ , se puede ver que

$$mf_{st} = 2f_c - B \quad \text{o} \quad f_{st} = \frac{2f_c - B}{m} \quad (3.14)$$

Donde  $m$  puede adquirir cualquier valor siempre que el criterio de Nyquist se cumpla para  $f_{st}$ .

Cuando la frecuencia de muestreo se incrementa, las replicas sufren un desplazamiento, en este ejemplo de la figura 3.10, la banda P a la derecha y la banda Q a la izquierda. Estas se solapan y ocurre un *aliasing*. Se ve entonces que, para evitar este aliasing, existe una frecuencia que la tasa de muestreo no debe exceder

$$\frac{2f_c - B}{m} \geq f_s \quad (3.15)$$

Por otro lado, si ahora se reduce la tasa de muestreo a una frecuencia, digamos  $f_{s''}$ , el espacio entre las replicas disminuye como se muestra en la figura 3.10. Nuevamente la imagen nos permite ver que se cumple que

$$(m + 1)f_{s''} = 2f_c + B \quad \text{o} \quad f_{s''} = \frac{2f_c + B}{m + 1} \quad (3.16)$$

Si la tasa de muestreo disminuye entonces la banda P se solapa al espectro original y ocurre un aliasing. Existe entonces una tasa de muestreo que  $f_{s''}$  siempre debe exceder para evitar este aliasing

$$f_{s''} \geq \frac{2f_c + B}{m + 1} \quad (3.17)$$

Combinando entonces las ecuaciones 3.15 y 3.17 se puede concluir un rango de valores validos de la frecuencia de muestreo para evitar el aliasing

$$\frac{2f_c - B}{m} \geq f_s \geq \frac{2f_c + B}{m + 1} \quad (3.18)$$

donde  $m$  es cualquier entero, siempre que se cumpla el criterio de Nyquist.

Un efecto del muestreo pasa bandas es que, para valores impares de  $m$ , el espectro en banda base observado se invierte con respecto al original, se dice entonces que se espejea. Para evitar esta inversión del espectro, el valor de  $m$  debe elegirse par.

## Capítulo 4

# Diseño y metodología

En este capítulo se describe con detalle la metodología utilizada durante el trabajo, empezando por las antenas utilizadas, pasando por la digitalización de la señal y hasta el tratamiento de las señales recibidas.

Para la recepción de señales de interferencia se utilizó un sistema de 4 antenas de larga longitud de onda, que se encontraban ya instaladas en el sitio de estudio. Cada antena está formada por un par de dipolos cruzados en V-invertida. Como sistema de tratamiento de señales de RFI se optó por el uso de la Radio Definida por Software, SDR, que en términos generales, es un sistema donde varios de los componentes que se implementan típicamente en hardware son implementados en software; esto se hizo a través de un Periférico de Radio Universal, USRP. La motivación para el uso de la SDR es que se tiene un sistema más compacto y flexible, precisamente al quitar componentes físicos que cubren un rango limitado de frecuencias. Para el procesamiento de los datos, utilizamos el software libre GNU radio, consistente en archivos y aplicaciones para la creación, procesado y análisis de señales, y el lenguaje de programación python.

El procedimiento para la detección de señales de RFI consistió en hacer un barrido de frecuencias, cubriendo un rango frecuencial total de 32 MHz (10-42 MHz), y se realizó escaneando ventanas adyacentes de 8 MHz de ancho de banda a la vez.

## 4.1. La antena.

Cada antena utilizada es una antena de dipolos cruzados en forma de V-invertida, con un rango frecuencial de operación de aproximadamente 10-90 MHz ( $\lambda \sim 30-3.3$  m). La antena consta de 2 partes: un par de dipolos y una cabecera electrónica (FEE). Una de las antenas utilizadas se muestra en la figura 4.3a, y la tabla 4.1 resume las principales características de ésta.

Tipo	Dipolo en V-invertida
Rango frecuencial	$\sim 10 - 90$ MHz
Máximo ancho de banda observable	32 MHz
Impedancia	50 $\Omega$

Tabla 4.1: Características principales de la antena dipolo V invertida utilizada.

La construcción de estas antenas esta basada en el diseño para antenas de larga longitud de onda descrito en [24]. El diseño final de esta antena está hecho con base en una serie de prototipos, simulaciones y mediciones, que consideran costo, peso, estabilidad mecánica, facilidad de fabricación y requerimientos de radiofrecuencia; una lectura detallada de este diseño final se puede ver en [24] y las referencias ahí.

Geométricamente cada dipolo se trata de dos marcos triangulares de piezas angulares de aluminio. Cada uno cuenta con dos barras transversales que le dan soporte, una vertical y una horizontal. La altura y base de cada triangulo es de 1.5 y 0.8 m respectivamente y cada pieza triangular se encuentra inclinada hacia al suelo  $45^\circ$  respecto al plano horizontal. El diseño mecánico de uno de estos marcos triangulares se muestra en la figura 4.1.

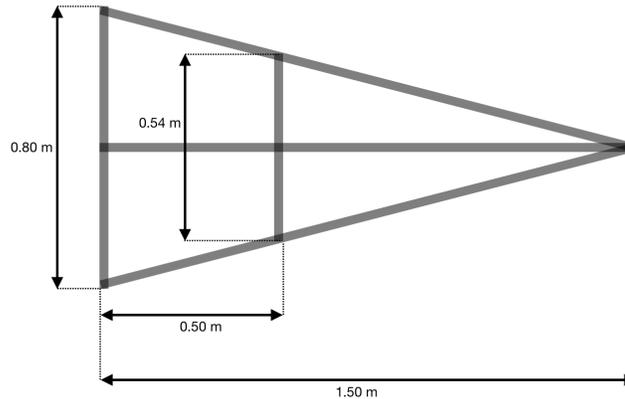


Figura 4.1: Diseño mecánico de un brazo de dipolo de la antena.

El patrón de radiación de la antena a 20 MHz en los planos E y H, planos que contienen el vector de campo eléctrico y magnético respectivamente, se muestra en la figura 4.2. Este patrón es casi el mismo en todo el rango de operación de la antena, como se puede ver en [24]. Este patrón de radiación deja ver que la antena de dipolos cruzados en V-invertida puede recibir señales de manera casi isotrópica, por lo que es ideal para detectar señales de RFI sin importar su ubicación espacial.

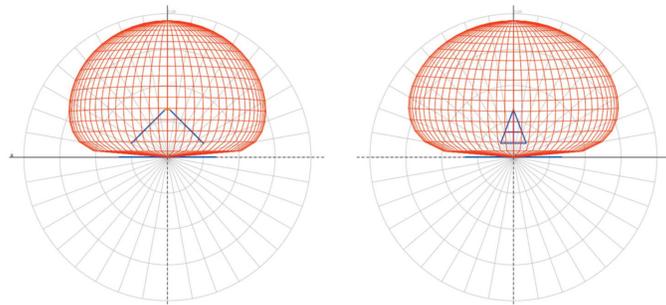


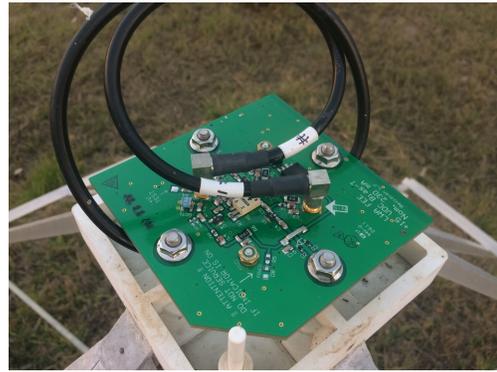
Figura 4.2: Patrón de radiación de la antena dipolo en el plano E (izquierda) y plano H (derecha) a 20 MHz. Obtenido de [24].

En el FEE, dentro de una caja de protección y montado en la punta del mástil de soporte de la antena, se encuentran dos tarjetas electrónicas, una por dipolo. Este FEE sirve para hacer coincidir la impedancia de la antena con el cableado y proporcionar la primera etapa de amplificación (35.5 dB) de las señales. Cada tarjeta electrónica se conecta a cada dipolo por

medio de tornillería y lleva la señal a través de cable coaxial *RG58C/U* (hoja de datos en secc. 9.2) a los elementos posteriores que la tratarán. La figura 4.3b muestra el FEE montado en la antena.



(a)



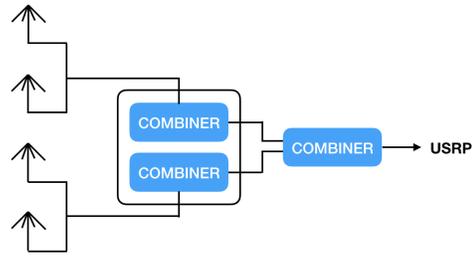
(b)

Figura 4.3: (a) Antena de dipolos cruzados. (b) FEE de la antena.

La primera conexión entre las antenas se hace en un módulo de registro ubicado entre las 4 antenas (figura 4.4a). A este módulo llega el coaxial de cada antena, 8 cables en total, y son conectados en dos grupos de 4 a un combinador de potencia de 4 vías *ZB4PD1 – 500+* (hoja de datos en sec. 9.2) cada grupo. Después la señal de ambos combinadores es llevada nuevamente por cable coaxial, *RG8/U* hasta un módulo de control, 2 coaxiales en total, donde son conectados a un combinador de 2 vías *ZSC – 2 – 1* (hoja de datos en sec. 9.2), aquí la señal de todas las antenas se ha combinado y esta lista para pasar hacia el hardware que la digitalizará, el USRP. El diagrama de bloques de estas conexiones entre combinadores de señal se muestra en la figura 4.4b. El traslado de la señal a través de cable coaxial se realizó cuidando que tanto las antenas como los coaxiales y combinadores tengan la misma impedancia de  $50 \Omega$ .



(a)



(b)

Figura 4.4: **(a)** Módulo de conexión para las 4 antenas. **(b)** Diagrama de bloques de conexiones entre los combinadores de señal.

#### 4.1.1. Trabajo sobre la antena.

Como se menciona en la introducción del capítulo, las antenas utilizadas se encontraban ya instaladas en el sitio al momento de iniciar este trabajo de tesis, sin embargo no estaban funcionando en su totalidad, por lo que fue necesario realizar algunas acciones para su completo funcionamiento.

Ya que el FEE de cada antena consta de dos tarjetas electrónicas, cada una de éstas necesita un voltaje de entrada para su funcionamiento (15 V), pero sólo a una de cada par se le estaba proporcionando dicho voltaje, por lo que sólo un dipolo por antena estaba en operación. Para hacer funcionar cada dipolo faltante se procedió a conectar las tarjetas a la fuente de voltaje. Para esto, se instalaron 4 *T de polarización* (Bias Tee ZNBT-60-1W+). Hoja de datos en sec. 9.2) y se armaron 4 cables coaxiales con conectores. Cada Bias Tee es conectado con el mismo tipo de cable coaxial *RG58C/U* a la fuente de voltaje, dotando de corriente así a cada tarjeta, el Bias Tee es también conectado al combinador de potencia. La figura 4.5 muestra el estado del interior del módulo de registro antes y después de agregar los elementos faltantes; la figura 4.6 muestra el diagrama de bloques de la conectividad eléctrica para una sola antena y para el sistema completo con las 4 antenas. Se puede ver como cada una de las antenas necesita 2 Bias Tee para dotarla de voltaje.

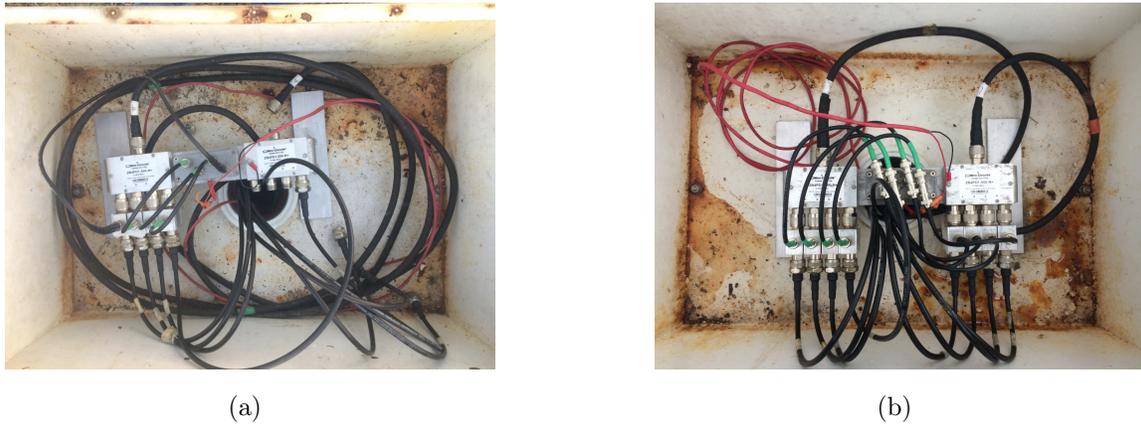


Figura 4.5: (a) Conexión antes y (b) después de agregar los elementos faltantes en el módulo de registro de las antenas.

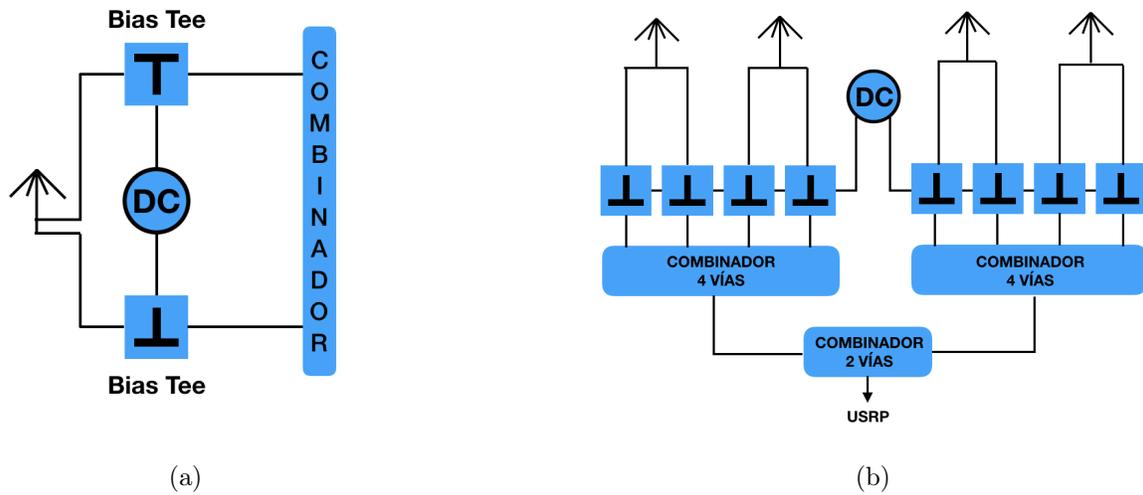


Figura 4.6: (a) Diagrama de bloques de conexión eléctrica para una antena y (b) del sistema completo de 4 antenas hasta su salida al USRP.

## 4.2. Filtro pasa bajas.

Como se menciona en la sección 3.3.2, aparecen inconvenientes de manera natural cuando una señal analógica es llevada al mundo digital. Señales armónicas, ruido y efectos de aliasing aparecen cuando se visualiza el espectro digital de la señal real en la banda de interés.

Una manera de evitar que señales de este tipo aparezcan en el espectro es colocando filtros, que permiten, o no, el paso de señales con frecuencias específicas. Para los fines de este trabajo no queremos que señales de frecuencias altas entren al espectro, para lo cual se colocó un *filtro pasa bajas*, LPF, cuya función es permitir el paso de señales con frecuencias bajas, o visto de otra manera, no permitir el paso de señales con frecuencias altas.

Filtros de este tipo funcionan atenuando las señales por encima de una frecuencia específica, llamada frecuencia de corte. Un filtro ideal, tendría una atenuación del 100 % inmediatamente después de la frecuencia de corte, pero en la práctica los filtros tienen una atenuación paulatina, de tal manera que la atenuación del 100 % se da más allá de la frecuencia de corte.

Para este trabajo el LPF utilizado es un BLP-30+ comercializado por Mini-circuits. Este filtro tiene una frecuencia de corte de 32 MHz, elegido así por ser la frecuencia máxima de la primera zona de Nyquist que se tiene en el sistema. La imagen 4.7 muestra el LPF utilizado, y la hoja de datos del mismo se puede consultar en el apéndice 9.2.



Figura 4.7: Filtro pasa bajas BLP-30+ utilizado.

## 4.3. La radio definida por software.

### 4.3.1. La SDR.

La Radio Definida por Software, SDR, es un sistema de radiocomunicación donde varios de los componentes que se implementan típicamente en hardware son implementados en software. La característica de este sistema que permite modificar, reemplazar y/o añadir programas, ofrece una gran flexibilidad para el desarrollo de diferentes sistemas de radiocomunicación, por lo que ha ganado popularidad en el área en años recientes. En este trabajo pretendemos aprovechar el desarrollo de este tipo de sistemas y utilizarlo a favor en la radioastronomía, creando un sistema para la detección de RFI.

La estructura de un receptor SDR consta de 3 bloques: una sección de la cabecera de RF, una sección de traslación a banda base y una sección de procesamiento de la señal. El diagrama de bloques de la estructura del receptor SDR se muestra en la figura 4.8.

- 1) **Bloque de cabecera de RF:** Es la sección donde se capta la señal de radio por la antena y es filtrada, amplificada y tal vez desplazada en frecuencia. Todo el procesamiento de la señal en esta sección es analógico.
- 2) **Bloque de banda base:** En esta sección se hace el procesamiento digital de la señal. Un convertidor analógico a digital, ADC, digitaliza la señal, un convertidor digital de bajada, DDC, traslada a banda base la señal y se diezma, es decir, se disminuye su tasa de muestreo.
- 3) **Bloque de procesado:** Finalmente en esta sección, la señal es procesada mediante algún software, según las necesidades de la aplicación.

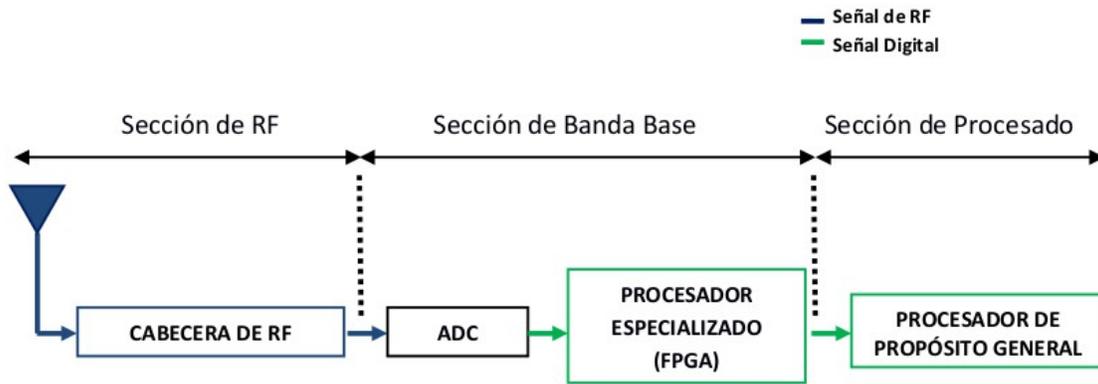


Figura 4.8: Diagrama de bloques de un receptor SDR, obtenido de [52].

### 4.3.2. EL USRP.

Un periférico de radio universal, USRP, es un tipo de SDR diseñado para funcionar como transmisor, receptor o tranceptor (transmisor y receptor) de radiofrecuencias. Existen diversos tipos de USRP fabricados por diversas compañías, para esta tesis se utilizó el USRP-1, diseñado y comercializado por Ettus Research. Se trata de la primera versión de esta empresa y también, por lo tanto, la más básica, cuya arquitectura consta de:

- 1) Una **tarjeta principal** (tarjeta madre) donde se encuentra un Field Programmable Gate Array (FPGA) cuya función es reproducir las funciones programadas para el sistema, 4 convertidores analógicos a digitales (ADC) que convierten la señal analógica a digital, 4 convertidores digitales a analógicos (DAC) que convierten la señal digital a analógica, un chip de interfaz USB 2.0 para transmitir los datos al PC y la alimentación eléctrica.
- 2) 4 ranuras para 4 **tarjetas secundarias** (tarjetas hijas) que pueden ser de transmisión (TX), de recepción (RX) o tarjetas para transmisión y recepción (TRX).

El diagrama de bloques para el USRP-1 se muestra en la figura 4.9.

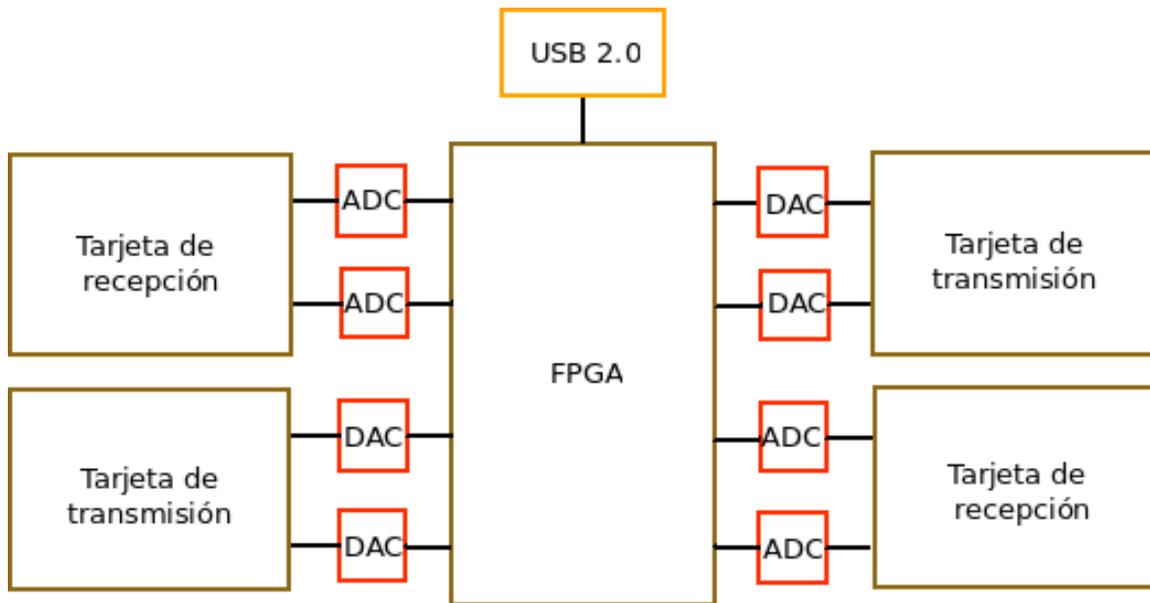


Figura 4.9: Diagrama de bloques del USRP-1.

El USRP-1 utilizado consta de un FPGA Altera Cyclone EP1C12Q240C8N y una tarjeta secundaria de recepción BasicRX. La tasa de muestreo de los ADC es de 64 MS/s, permitiendo digitalizar un ancho de banda de hasta 32 MHz, cada ADC tiene una resolución de 12 bits, un rango completo de 2 V pico a pico y admite una potencia máxima de 20 mW o 13 dBm. La tarjeta secundaria admite señales en tiempo real de 1-250 MHz y tiene un ancho de banda de hasta 100 MHz,<sup>1</sup> y no tiene elementos de ganancia programados. El USRP y la tarjeta secundaria utilizados se muestran en la figura 4.10 y las características principales de ambos se resumen en las tablas 4.2 y 4.3.

<sup>1</sup>Este ancho de banda está limitado por la capacidad de los ADC en el USRP, siendo 100 MHz su máximo valor.



Figura 4.10: USRP-1 (izquierda) y tarjeta secundaria BasicRX (derecha) utilizados.

Ancho de banda	Hasta 8 MHz
Alimentación	6V DC
ADC tasa de muestreo	64 MS/s
ADC resolución	12 bits

Tabla 4.2: Características del USRP-1.

Uso	Recepción
Rango de frecuencia	1-250 MHz
Ancho de banda	hasta 100 MHz/canal
No. canales	2
Ganancia	Sin ganancia programada

Tabla 4.3: Características de la tarjeta BasicRX.

El proceso de tratamiento que recibe la señal desde la antena y pasando a través del sistema completo se da de la siguiente manera:

En el stand de la antena: la señal de radio frecuencia es captada por cada dipolo (2 dipolos por antena) y amplificada en cada FEE por 35.5 dB.

En el módulo de conexión: la señal amplificada de cada dipolo es llevada a través de cable coaxial y pasa a través de combinadores de potencia, de donde se obtiene una única señal. Una vez esto, la señal pasa a través del filtro pasa bajas, que elimina las señales de alta frecuencia.

En el USRP: Después del LPF, la señal llega al USRP y entra primero a la tarjeta secundaria que la acopla a la tarjeta madre. Una vez en la tarjeta madre primero un amplificador de ganancia programable, PGA, de rango de 0-20 dB puede amplificar la señal, después es digitalizada por el ADC a una frecuencia de muestreo de 64 Msps. Una vez digitalizada, la señal es trasladada a banda base por un convertidor de bajada, DDC, y finalmente se lleva a cabo un proceso de reducción de la tasa de muestreo de la señal, llamado diezmado. Esta reducción en la tasa de muestreo se hace para respetar la tasa de transmisión de datos a través de la interfaz USB, de 32 MB/s. Los datos a la salida del USRP tienen un tamaño de 4 bytes por muestra, por lo que la tasa de muestreo de 64 Ms/s se diezma por un factor de 8, lo que permite digitalizar el espectro con un ancho de banda máximo de 8 MHz. Finalmente la señal pasa al ordenador vía USB 2.0 para su posterior tratamiento. El esquemático de este proceso se muestra en la figura 4.11.

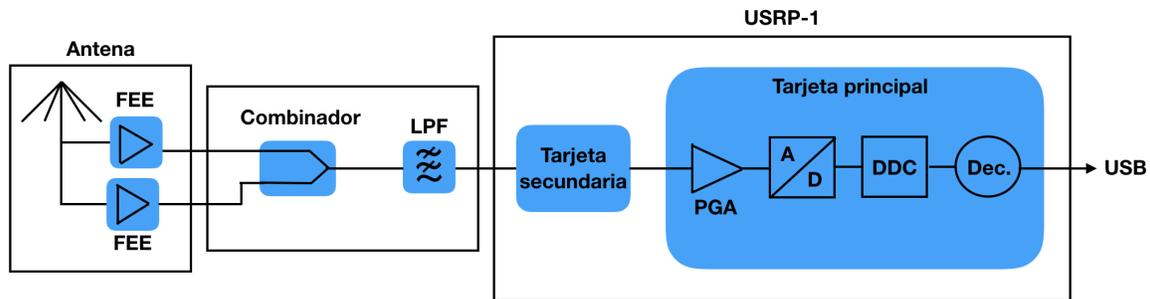


Figura 4.11: Esquemático del camino de la señal a través de los elementos empleados, a partir de una antena hasta su salida del USRP vía USB.

#### 4.4. GNU radio y GNU radio Companion.

GNU radio es un kit de herramientas de código abierto y libre para software de radio. Es mediante GNU radio que se realizó el procesamiento digital de las señales en este trabajo. El USRP se configuró mediante GNU Radio a través de GNU Radio Companion, GRC, que es una interfaz gráfica basada en la utilización de ventanas y bloques.

La programación en GNU radio se puede realizar de dos maneras: creando un código en el lenguaje de programación python o a través de GRC. La programación a través de GRC se realiza básicamente colocando bloques y uniendolos mediante conectores en un entorno gráfico, creando así un grafo.

Los tipos de bloques utilizables para programar gráficos en GRC son básicamente 4:

- *source*: especifican y leen datos de cualquier tipo de fuente.
- *sink*: especifican el destino final de la señal.
- *variable*: permiten variar los valores de los parámetros de los bloques.
- *chooser*: permiten crear una variable con un menú de opciones en cuanto al valor de la misma.

Para este trabajo se realizó la programación a través de GRC. En primer lugar se creó un grafo para un analizador de espectros (Grafo A). Éste se hace a través del algoritmo para la Transformada Rápida de Fourier (FFT). La FFT es un algoritmo que realiza la Transformada Discreta de Fourier, DTF, a mayor velocidad de lo que lo realizan otros algoritmos. Ya que la DFT requiere un número total de  $N^2$  multiplicaciones complejas y  $N^2$  sumas complejas, implica un tiempo de cálculo muy grande. La FFT reduce el número de operaciones logrando así reducir también el tiempo de cómputo. Para ver un análisis completo sobre la FFT vease [44].

Además del grafo hecho para el analizador de espectros se creó un grafo más para visualizar los datos de las señales obtenidas (Grafo B).

La figura 4.12 muestra el grafo programado en GRC para un analizador de espectros. El grafo consiste de un bloque para el USRP, configurado acorde a las características de éste, 2 bloques para desplegar el espectro observado: un gráfico de frecuencia y un gráfico de tiempo, un bloque más para un gráfico de frecuencia, 2 bloques para guardar los datos adquiridos por el USRP en archivos y bloques para los parámetros de tasa de muestreo, ganancia del sistema, ancho de banda desplegado y frecuencia sintonizada.

Cuando se ejecuta cualquier grafo realizado se lanza una ventana donde se puede ver tanto los gráficos de frecuencia y tiempo como las variables que pueden ser modificadas al tiempo que

se realiza el escaneo.

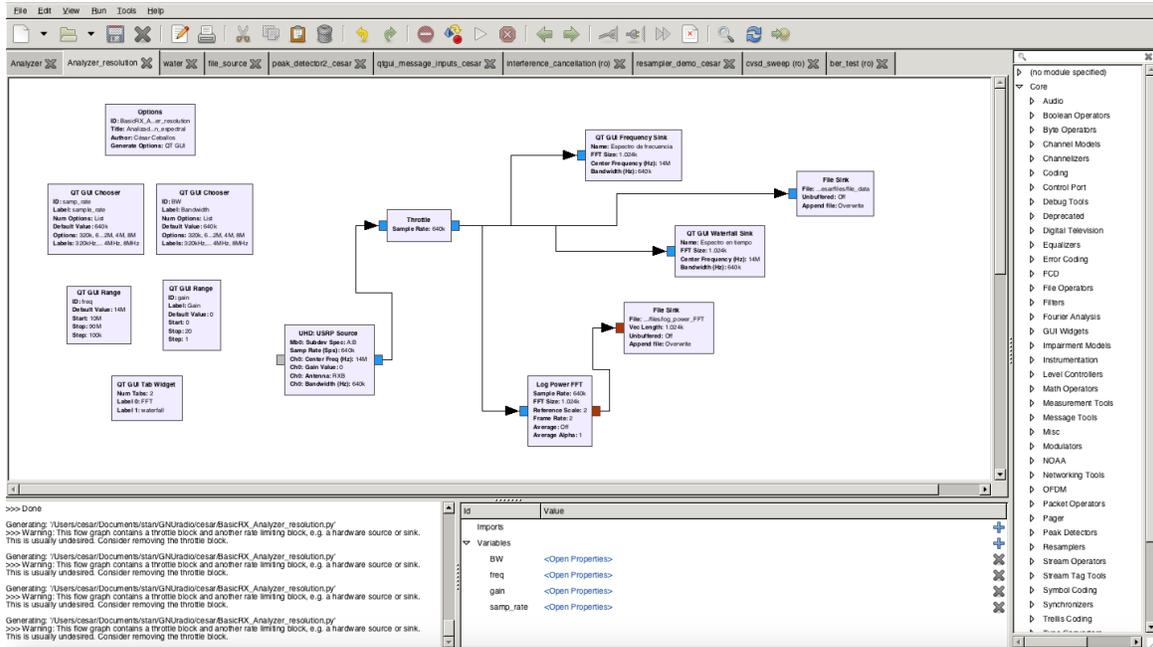


Figura 4.12: Grafo programado en GRC para un analizador de espectros.

En los siguientes párrafos se describirá con detalle cada grafo programado, comenzando por el analizador de espectros, que será a través del cual se realice la parte medular de este trabajo.

Los bloques individuales del Grafo A se muestran en las figuras 4.13 - 4.17 y las propiedades de estos se describen a continuación. Todos los parámetros de los bloques permiten ser modificados y cada uno especifica una característica del sistema. Común a todos los bloques, el primer parámetro configurable es el nombre de identificación, *ID*, que permite usar las propiedades de un bloque específico en cualquier parte del grafo llamándolo mediante su ID, como se verá a continuación.

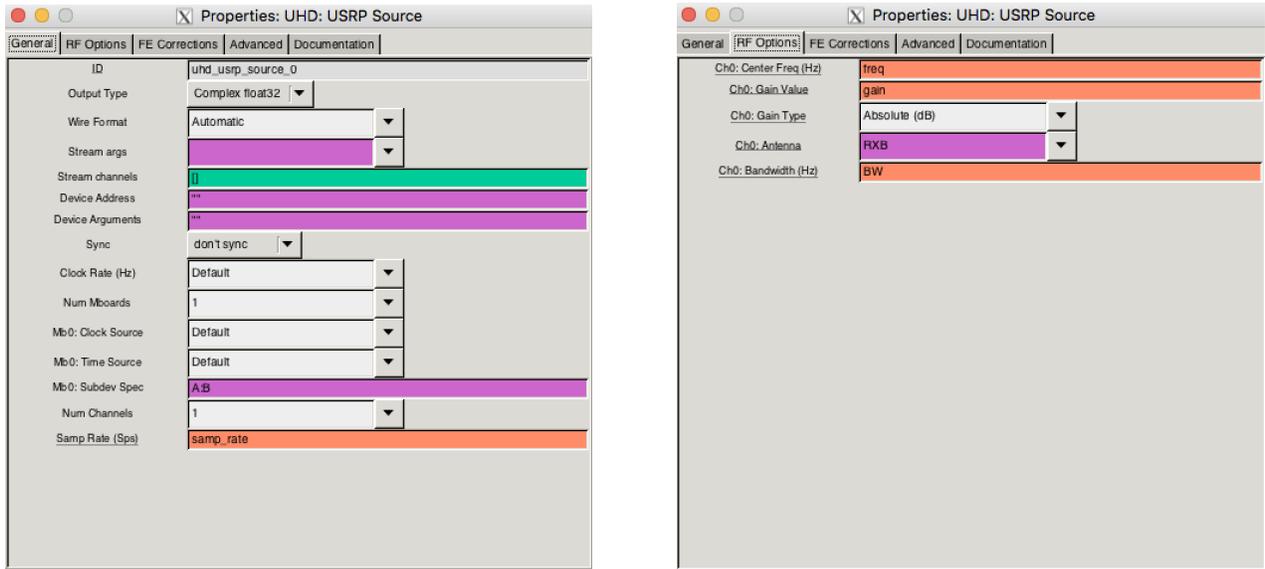


Figura 4.13: Propiedades del bloque *USRP*.

El primer bloque corresponde al USRP y es del tipo *source*, éste se configura de acuerdo a las características del USRP y de la tarjeta secundaria. Los parámetros principales de este bloque son:

- *Output type*: especifica el tipo de salida de los datos del USRP, en este caso es del tipo complejo a 32 bits, *Complex Float32*.
- *Mb 0 subdev Spec*: especifica la ranura en el USRP donde está instalada la tarjeta secundaria, A en este caso, y el receptor de la antena que se utiliza en la tarjeta secundaria, B; quedando así establecido como *A:B*.
- *Samp Rate (Sps)*: especifica la tasa de datos a la salida del USRP, se le asigna el ID *samp\_rate*.
- *Ch0: Center Freq (Hz)*: especifica lo frecuencia del receptor, se le asigna el ID *freq*.
- *Ch0: Gain Value*: especifica la ganacia del sistema completo, se le asigna el ID *gain*.
- *Ch0: Antenna*: especifica el tipo de tarjeta a utilizar, *RX2* en este caso para una tarjeta de recepción.
- *Ch0: Bandwidth (Hz)*: especifica el ancho de banda en el receptor, se elige a *0* para usar el filtro de ancho de banda default.

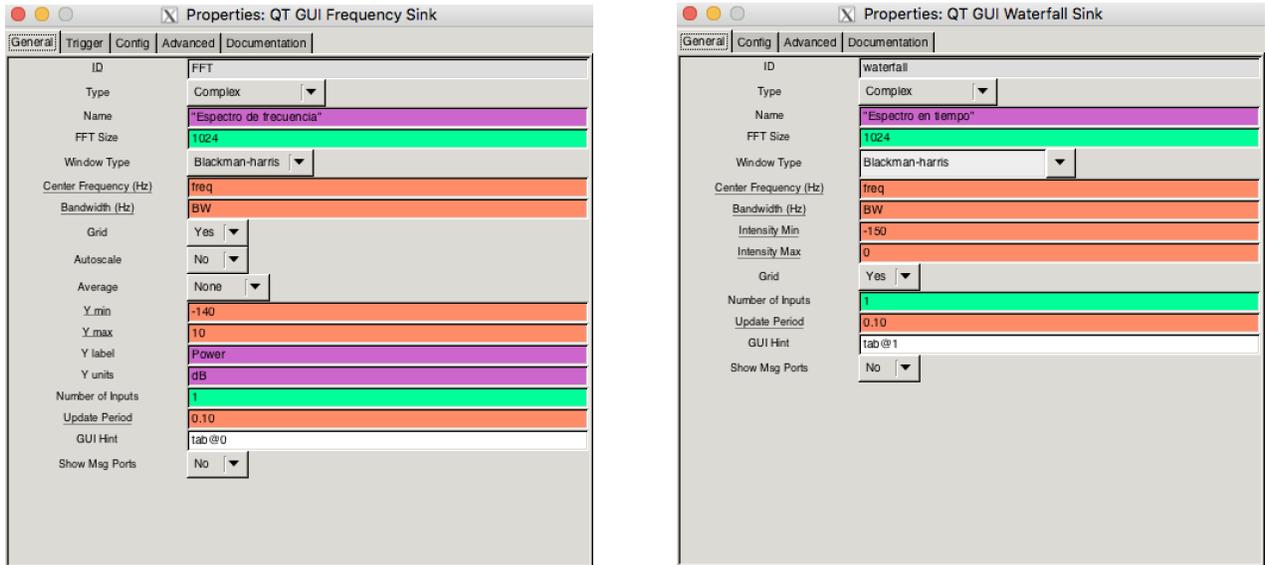


Figura 4.14: Propiedades de los bloques *Frequency* (izquierda) y *Waterfall* (derecha).

Los bloques de la figura 4.14 corresponden a los gráficos de frecuencia (*Frequency*) y tiempo (*Waterfall*). El gráfico *Frequency* muestra el nivel de potencia de la señal recibida frente a la frecuencia, éste se genera aplicando la transformada rápida de Fourier, FFT, a los datos recibidos del USRP. El gráfico *Waterfall* muestra un espectro dinámico, en los ejes grafica tiempo frente a frecuencia, y en un código de colores la potencia de la señal recibida. Ambos bloques son del tipo *sink*, y tienen algunas propiedades en común:

- *Type*: especifica el tipo de datos que entra al bloque, se elige *Complex* en este caso, ya que es el tipo de datos saliendo del USRP.
- *FFT size*: permite ajustar el tamaño de la FFT a visualizar, se elige a *1024*.
- *Center Frequency (Hz)*: especifica la frecuencia central sintonizable, se le asigna el ID *Freq*.
- *Bandwidth*: permite elegir al ancho de banda a visualizar, se le asigna el ID *BW*.

El resto de parámetros ajustables de ambos bloques son para la visualización del gráfico que se desplegará, como los ejes, etiquetas y otras características visuales.

Los bloques de la figura 4.15 corresponden a un bloque para FFT (*Log Power FFT*) y un bloque para guardar los datos adquiridos (*File Sink*).

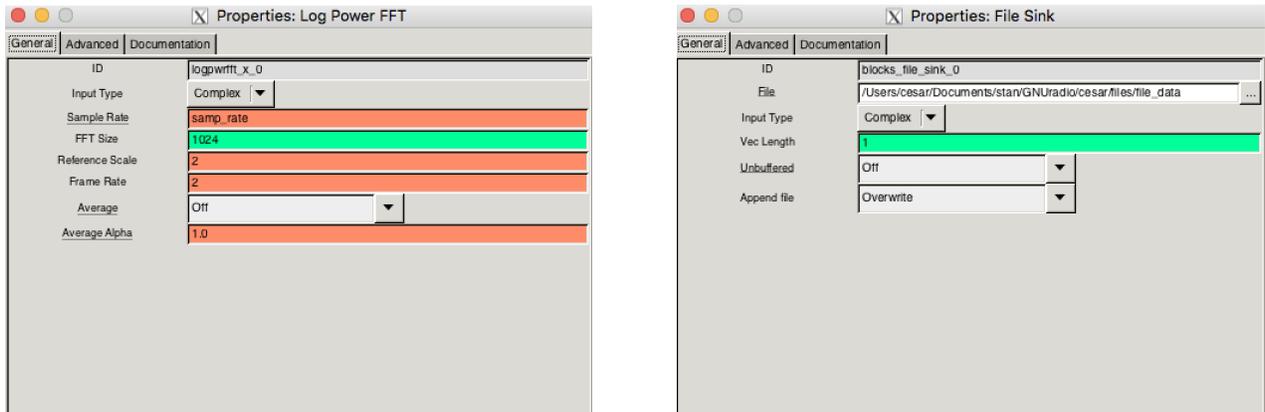


Figura 4.15: Propiedades de los bloques *log power FFT* (izquierda) y *File Sink* (derecha).

Las propiedades principales del bloque *Log Power FFT* son:

- *Type*: especifica el tipo de datos que entra al bloque, se elige *Complex*.
- *Sample Rate*: especifica la tasa de muestreo, se le asigna el ID *samp\_rate*.
- *FFT size*: especifica el tamaño de la FFT, se elige de *1024*.

Por otra parte, las propiedades del bloque *File source* son:

- *File*: permite elegir el directorio donde se guardará el archivo y el nombre del archivo.
- *Input Type*: especifica el tipo de datos que entra al bloque, se elige *Float*, que es el tipo de datos saliendo del bloque *Log Power FFT*, al que esta conectado.

Los bloques de las variables de tasa de muestreo (*sample rate*) y ancho de banda (*bandwidth*) son del tipo *Chooser* y se muestran en la figura 4.16. Este tipo de bloques permite elegir un valor de entre varios y poder cambiarlo en tiempo real en la ventana desplegada al ejecutar el grafo. Las características de estos son iguales, ya que están directamente relacionados el ancho de banda que se puede digitalizar y la frecuencia de muestreo dada.

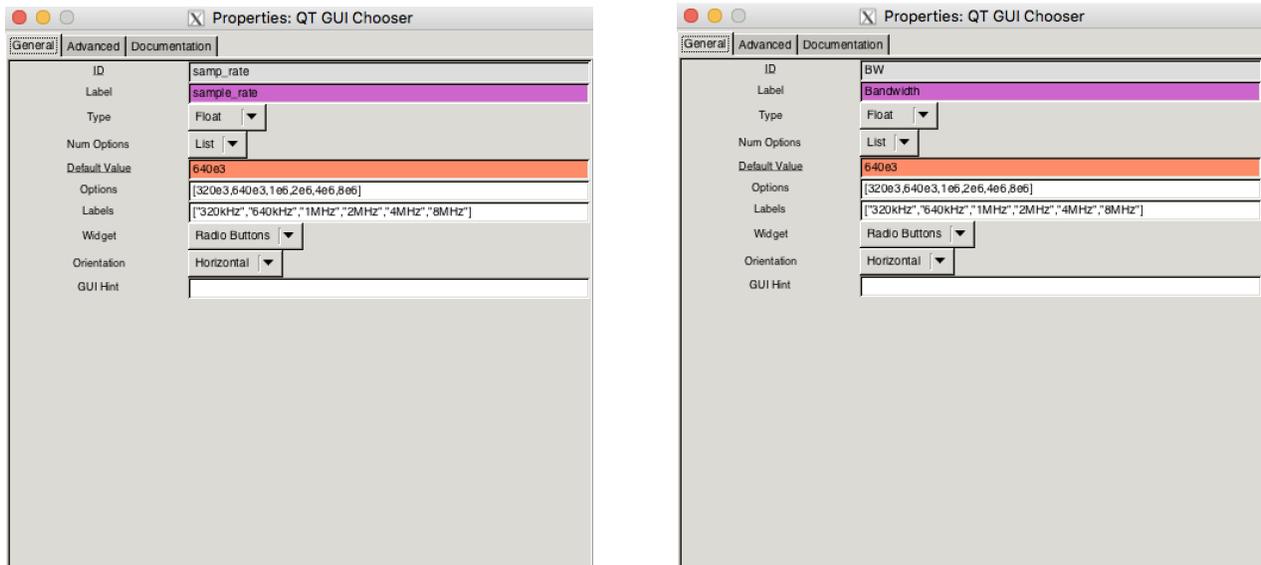


Figura 4.16: Propiedades de los bloques *sample rate* (izquierda) y *bandwidth* (derecha).

Las propiedades de estos bloques son:

- *Type*: especifica el tipo de datos del bloque, se elige *float*.
- *Default Value*: permite elegir un valor de la variable que aparecerá por default al momento de visualizar la ventana, se elige de  $8\text{ MHz}$ , ya que es el ancho de banda que queremos visualizar.
- *Options*: permite especificar los valores que queremos que adopte la variable. Estos no pueden tomar cualquier valor, por razones de eficiencia de la FFT se eligen a  $320\text{ kHz}$ ,  $640\text{ kHz}$ ,  $1\text{ MHz}$ ,  $2\text{ MHz}$ ,  $4\text{ MHz}$  y  $8\text{ MHz}$ .

El resto de propiedades son para elegir características de visualización en la ventana, como nombres y ubicación de los íconos. Los íconos de estas variables de tasa de muestreo y ancho de banda aparecerán en la ventana al ejecutarse el grafo.

Finalmente se tienen dos bloques más de variables, estos son del tipo *range*, esto es, la variable adoptará un valor de entre un rango de valores posibles. Estos también aparecerán en la ventana de visualización. Los bloques corresponden a la variable de frecuencia sintonizable (*Frequency*) y ganancia (*Gain*), mostrados en la figura 4.17.

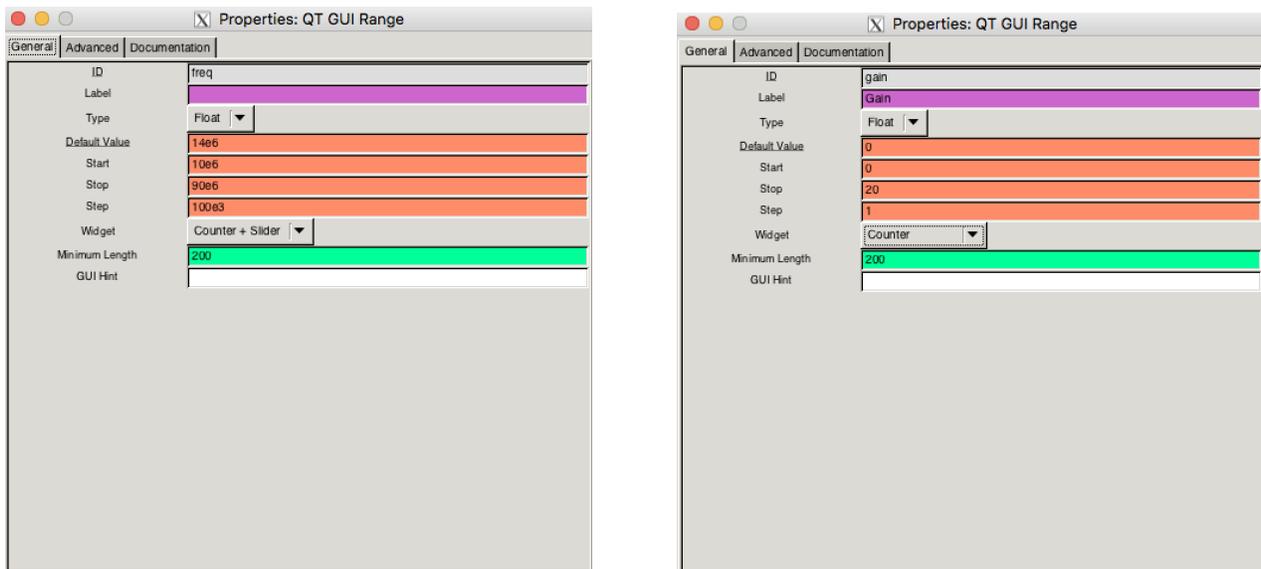


Figura 4.17: Propiedades de los bloques *frequency* (izquierda) y *gain* (derecha).

Las propiedades del bloque *frequency* se eligen para sintonizar la frecuencia central de la banda que se pretende ver, ya que en principio queremos ver ventanas de 8 MHz de ancho, el valor de la frecuencia será la frecuencia central de cada ventana que se estudiará.

- *Type*: se elige como *Float*.
- *Default Value*: permite elegir un valor para la variable, que aparecerá por default al momento de visualizar la ventana, se elige de  $14\text{ MHz}$ .
- *Start*: especifica el valor inicial del rango de valores para la variable, se elige a  $14\text{ MHz}$ .
- *Stop*: especifica el valor final del rango de valores para la variable, se elige a  $86\text{ MHz}$ .
- *Step*: especifica el tamaño del paso para barrer el rango total de valores, se elige a  $1\text{ MHz}$ .

Las propiedades del bloque *Gain* se configuran de acuerdo a las ganancias totales del sistema, ya que la tarjeta secundaria no tiene ganancias programables, el rango de esta variable se asigna sólo para la ganancia del PGA en la tarjeta principal que va de 0 a 20 dB.

- *Type*: se elige como *Float*.
- *Default Value*: permite elegir un valor para la variable, que aparecerá por default al momento de visualizar la ventana, se elige de  $0$ .
- *Start*: especifica el valor inicial del rango de valores para la variable, se elige a  $0$ , la mínima

ganancia del PGA.

- *Stop*: especifica el valor final del rango de valores para la variable, se elige a *20*, la máxima ganancia que permite el PGA.
- *Step*: especifica el tamaño del paso para barrer el rango total de valores, se elige a *1*, para dar pasos unitarios al variar la ganancia.

La figura 4.18 muestra el grafo programado para leer y visualizar los datos obtenidos con el USRP. El grafo consiste de un bloque para cargar el archivo de datos, 2 bloques para desplegar el espectro observado: un gráfico de frecuencia y un gráfico de tiempo, y los mismos bloques de los parámetros de tasa de muestreo, ganancia del sistema, ancho de banda desplegado y frecuencia sintonizada del primer grafo.

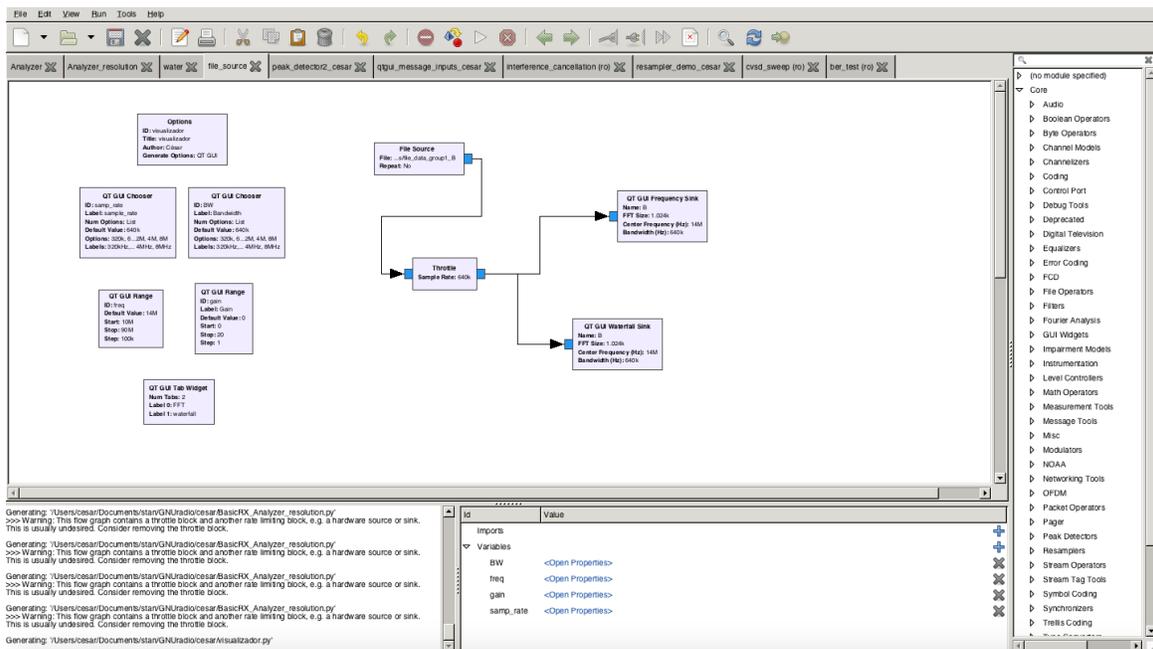


Figura 4.18: Grafo programado en GRC para visualizar los datos obtenidos durante el barrido de frecuencias.

Los bloques para este grafo son los mismos del primero excepto por los bloques *File Source* y *Log Power FFT* y tienen las mismas propiedades que sus equivalentes al grafo anterior. A este grafo se le añade un bloque que lee un archivo de datos (*File Source*), y se muestra en la figura 4.19.

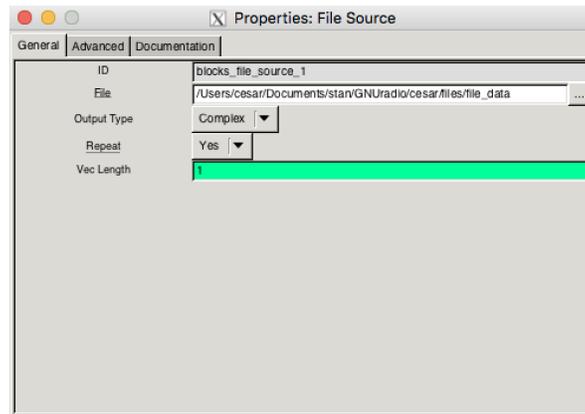


Figura 4.19: Propiedades del bloque *File Source*.

Las propiedades de este bloque son:

- *File*: especifica el nombre del archivo a leer.
- *Output Type*: especifica el tipo de datos de salida.
- *Repeat*: permite elegir si el archivo se repite al finalizar o sólo se reproduce una vez.

Las figuras 4.20 y 4.21 muestran las ventanas originadas por el grafo A al ser ejecutado. La figura 4.20 muestra la ventana que visualiza el gráfico de frecuencia. El panel de la derecha es el panel de control propio del gráfico. Éste permite modificar algunas características en tiempo real, sin necesidad de reprogramarlo en el grafo. El tamaño de la FFT, el tipo de ventana de la FFT, escala, rango de ejes y nivel de referencia son algunas de éstas propiedades que se pueden controlar desde la ventana.

Además del panel de control aparecen los íconos de ancho de banda, frecuencia de muestreo, ganancia y frecuencia sintonizada, programados mediante los bloques *BW*, *samp\_rate*, *gain* y *freq*.

La figura 4.21 muestra la ventana que visualiza el gráfico del espectro dinámico. Ésta ventana no tiene la opción del panel de control y se observan los mismos íconos de la ventana del espectro de frecuencia para manipular los valores de ancho de banda observable, frecuencia de muestreo, ganancia y frecuencia sintonizable.

La ventana que despliega el grafo B, es exactamente la misma del grafo A, ya que este grafo carga y lee el archivo guardado mediante el bloque *File Sink*. Ambos gráficos, de frecuencia y tiempo son mostrados nuevamente, pero con los datos obtenidos en tiempo real.

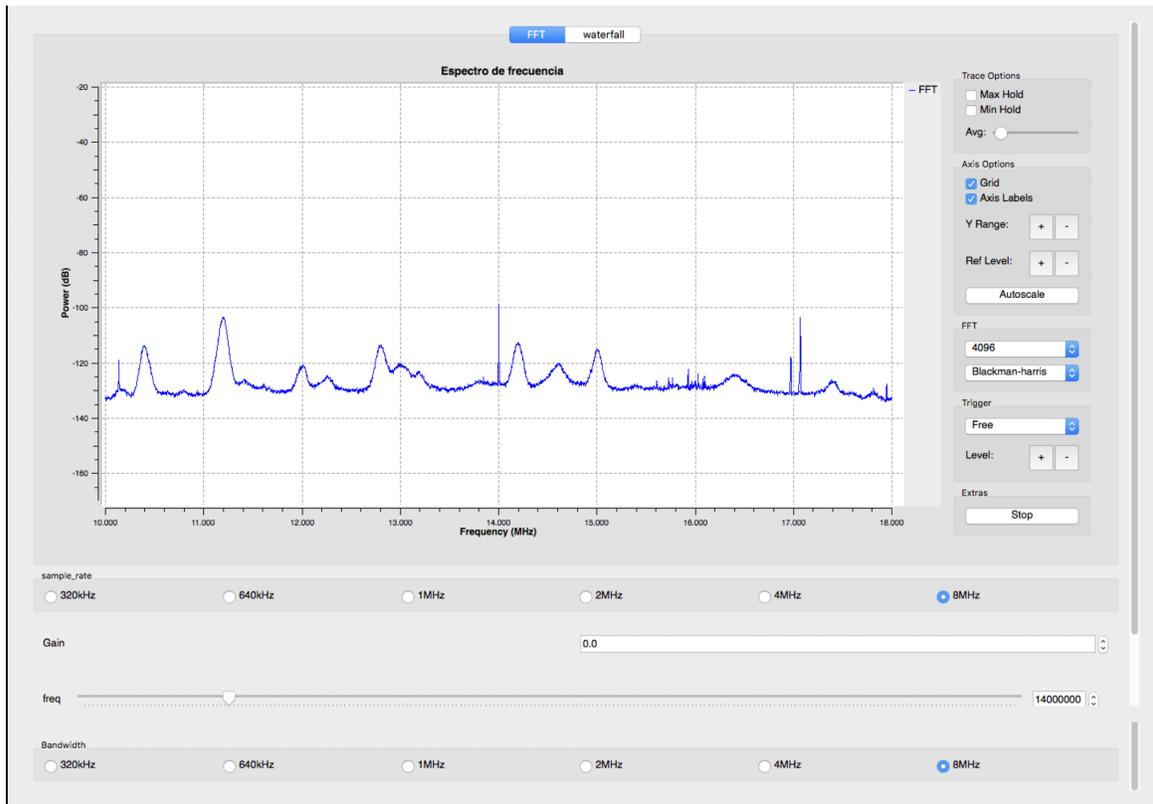


Figura 4.20: Ventana desplegada por el Grafo A, el espectro de frecuencia es visible.

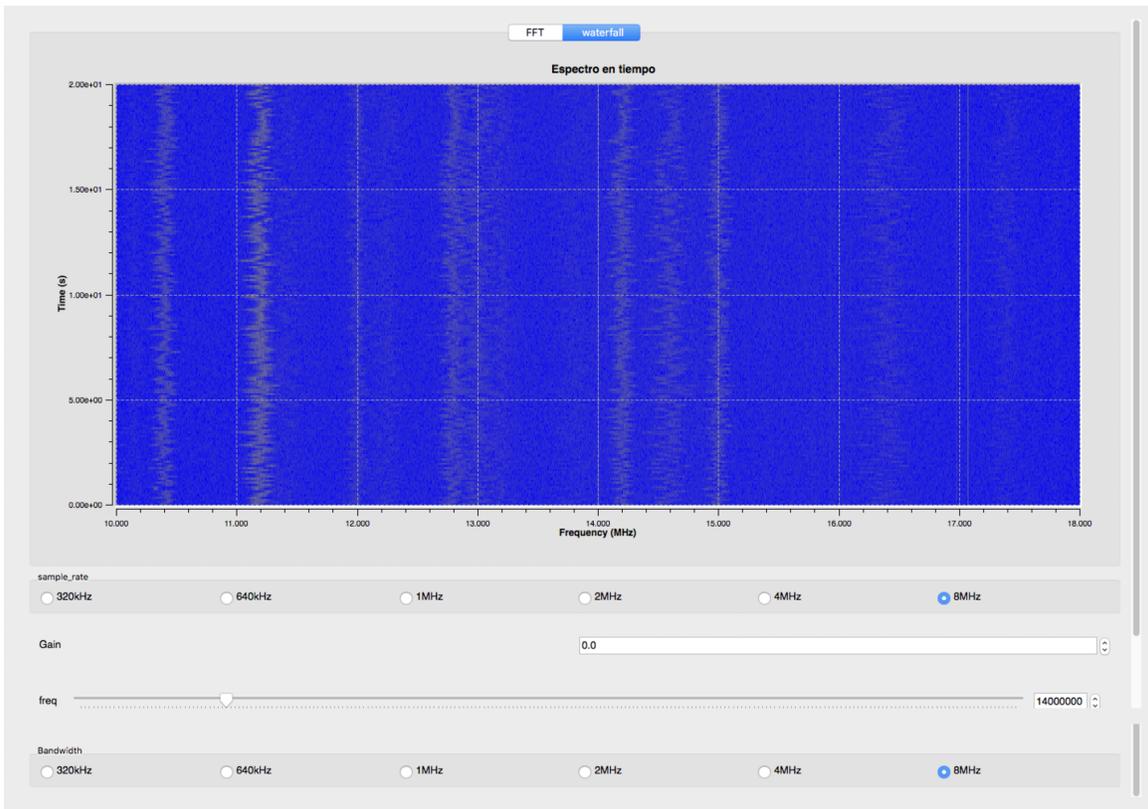


Figura 4.21: Ventana desplegada por el Grafo A, el espectro dinámico es visible.

## 4.5. Prueba de funcionamiento del USRP con GNU radio.

Para verificar el correcto funcionamiento del USRP y de los grafos hechos en GRC se realizaron algunas pruebas antes de comenzar a obtener datos con las antenas. Para esto se utilizó el generador de señales *AFG3102* de Tektronix, que permite manipular además de la frecuencia, la potencia de las señales generadas, y el analizador de espectros analógico *FS300* de Rohde & Schwarz, que cubre el rango de frecuencias del generador de señales y permite elegir las unidades que despliega en pantalla para el nivel de potencia de las señales que recibe.

Primero se calibró el USRP. Los gráficos de la FFT en GRC muestran la potencia de las señales recibidas en unidades de dB, sin embargo, como se menciona en el apéndice 9.1, los dB necesitan ser relativos a una medida para tener significado, por lo que se debe calibrar por separado el USRP para obtener la potencia, en este caso, elegida a unidades de dBm.

Para calibrar el USRP se generaron 3 señales en el AFG3102 a distintas frecuencias: 10, 20 y 30 MHz, y con distintas potencias cada una: 10, 5 y -10 dBm respectivamente. Se verificó que las señales generadas correspondían en frecuencia a las mostradas por el analizador de espectros y se midió su potencia en el FS300, que permite ver este nivel en unidades de dBm. Después se procedió a conectar el generador al USRP. Con las mismas señales de antes (a la misma frecuencia y con la potencia correspondiente) se comprobó que los niveles de potencia variaban en 34 unidades entre los dB de GRC y los dBm del FS300, es decir, la señal generada a 10 dBm en el generador de señales mostraba una potencia en los gráficos de GRC de -24 dB, la de 0 dBm se mostraba a -34 dB y la de -10 dBm se veía a -44 dB. De esta manera fue calibrado el USRP en potencia.

Una vez calibrado el USRP se generaron dos señales por separado a diferentes frecuencias (48 y 70 MHz) y potencias (5 y -8 dBm) en el generador de señales y se conectó al USRP. En el entorno de GRC, se visualizaron las señales generadas para comprobar que la frecuencia y potencia de éstas coincidiera con lo programado. Así se comprobó que los grafos realizados estaban funcionando correctamente, y el sistema estaba listo para obtener datos reales. En la figura 4.22 se muestra el generador de señales conectado al analizador de espectros y los gráficos de frecuencia en GRC de las señales generadas.

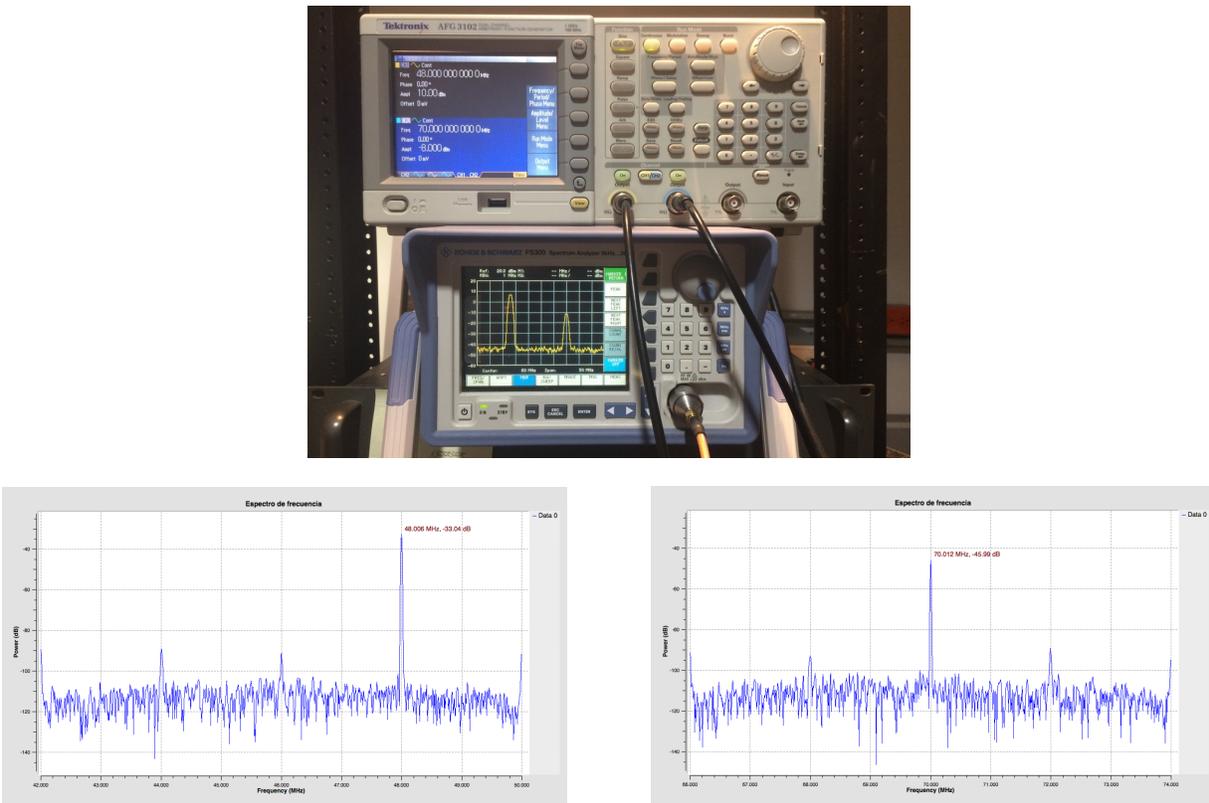


Figura 4.22: Generador de señales conectado al analizador de espectros para prueba (arriba) y señales generadas vistas en el entorno de GRC (abajo). En el generador se puede ver las especificaciones en frecuencia y potencia para ambas señales, que se despliegan en la pantalla del analizador de espectros y en los gráficos desplegados por GRC.

## 4.6. Protocolo de Barrido de frecuencias

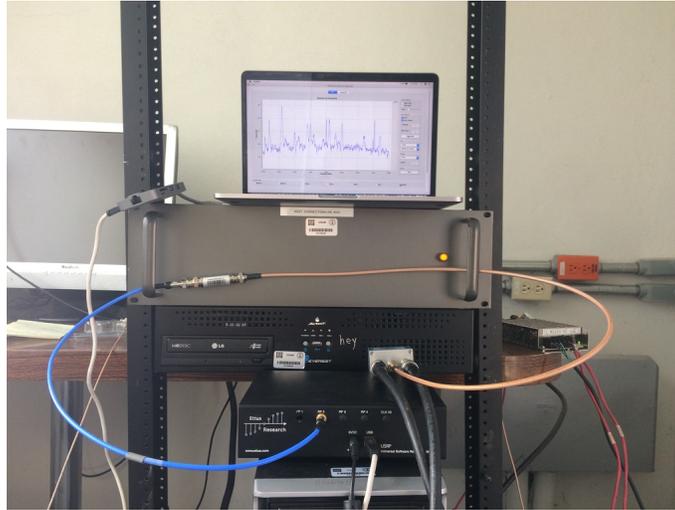
Para determinar el protocolo del barrido de frecuencias los parámetros del USRP jugaron un papel decisivo, la tasa de muestreo de los ADC de 64 MS/s y el ancho de banda digitalizable de hasta 8 MHz como limitantes marcaron el camino. Así, tomando en cuenta estos factores se decidió realizar el barrido de frecuencias en 4 ventanas espectrales de 8 MHz de ancho de banda cada una: 10-18, 18-26, 26-34 y 34-42 MHz, en adelante llamadas ventanas A, B, C y D respectivamente. La ventana D se pudo estudiar a pesar del LPF instalado a la entrada del USRP, aprovechando la atenuación lenta del filtro, permitiendonos ir hasta 42 MHz sin comprometer los resultados.

Idealmente los barridos de frecuencia por RFI se realizan de manera constante, es decir, el escaneo se realiza todo el tiempo. Nosotros decidimos fijar el tiempo de escaneo a 30 segundos por cada ventana, por lo que el escaneo completo se realiza en un tiempo de 2 minutos. Este tiempo de barrido se eligió así por el espacio en disco que ocupa guardar los datos obtenidos, que representa una limitante para nosotros. Ya que los datos a la salida del USRP tienen un tamaño de 4 bytes y se está digitalizando un ancho de banda de 8 MHz, un total de 32 Mb por segundo de información se están grabando, esto implica que por cada barrido del rango frecuencial total que se hace en 2 minutos se tienen datos ocupando casi 4 Gb de espacio en disco.

Entonces, con un ancho de banda de 8 MHz, una FFT de 4096, una ventana Blackman-harris, se realizó el barrido de frecuencias.

Para ejecutar el barrido de frecuencias se escribió un código en el lenguaje python. El código funciona dando la instrucción al USRP de cambiar la frecuencia central de la ventana que se escanea, cada tiempo determinado, realizando así el barrido espectral. Este barrido cubre el rango de los 32 MHz totales escaneando una ventana de ancho de 8 MHz a la vez,. Cuando termina el tiempo de escaneo en la ventana D el programa se repite y comienza el escaneo de nuevo en la ventana A.

El código del barrido de frecuencias permite seleccionar el ancho de banda de la ventana que se escanea, así como la frecuencia y el tiempo de escaneo. Éste se ejecuta independiente al código del grafo hecho en GRC, de tal manera que no afecta su estructura y así puede ser modificado en las 3 variables sin alterar el grafo o recurrir a éste para modificarlas. El código del barrido de frecuencias se muestra en el apéndice 9.5. Una imagen del sistema ejecutando el escaneo del espectro se muestra en la figura 4.23a y el diagrama de bloques de los elementos mostrados en el figura 4.23b.



(a)



(b)

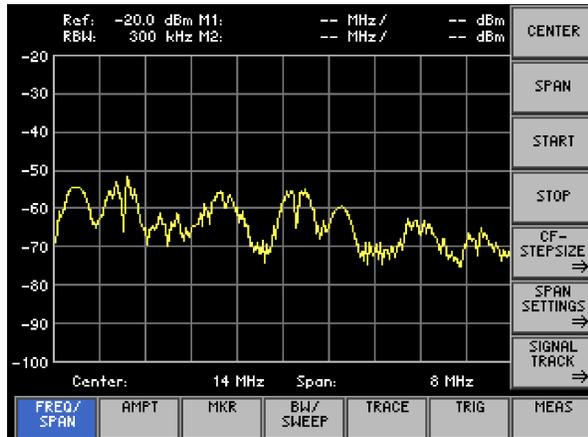
Figura 4.23: Imagen del sistema de detección de RFI ejecutando un escaneo. El combinador ZCS-2-1, el LPF, el USRP y el grafico FFT de GRC se muestran en (a), así como el diagrama de bloques de estos elementos conectados en (b).

#### 4.6.1. Escaneo analógico de prueba.

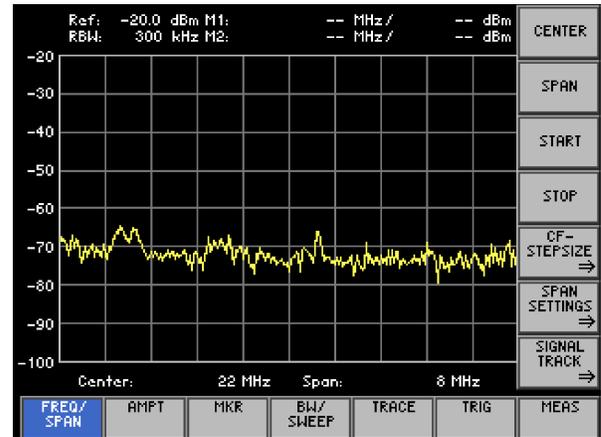
Para comprobar que el sistema construido se ejecutó correctamente haciendo el barrido decidimos utilizar el analizador de espectros analógico para escanear el rango frecuencial de interés. Así podemos contrastar los resultados obtenidos y calificar finalmente el funcionamiento del sistema digital.

Se realizó entonces un escaneo de las 4 ventanas con el analizador de espectros FS300. La prueba se hizo conectando las mismas 4 antenas al analizador FS300, con el mismo filtro pasa bajas, haciendo el cambio de ventana manualmente en el analizador durante el mismo tiempo

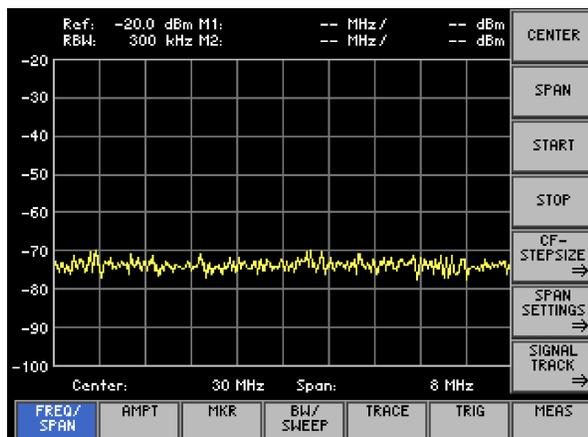
de escaneo. La figura 4.24 muestra el espectro obtenido para cada una de las 4 ventanas.



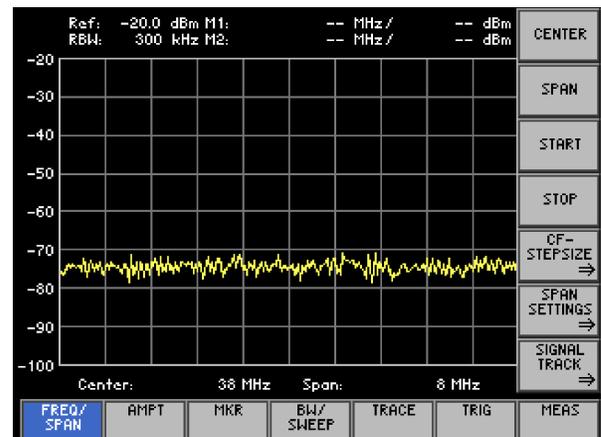
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.24: Resultados del escaneo realizado con el analizador de espectros en las ventanas de interés: (a) 10-18 MHz, (b) 18-26 MHz, (c) 26-34 MHz, (d) 34-42 MHz.

Los espectros obtenidos muestran que las dos primeras ventanas tienen presencia de señales, y que las dos ventanas restantes aparecen libres. Señales a 10.4, 11.4, 11.8, 12.2, 13.0, 14.1, 14.4, 17.2 y 17.4 MHz fueron identificadas.

## Capítulo 5

# Resultados e identificación de interferencia.

Para la visualización de los datos obtenidos por el barrido de frecuencias tenemos tres opciones: en primer lugar, se puede hacer una visualización en tiempo real de los gráficos de frecuencia y tiempo del *Grafo A* de GRC. La segunda, es una visualización fuera de tiempo, pero también en el entorno de GRC, mediante el *Grafo B* realizado para leer los archivos de datos guardados. La tercera es una visualización a través de python.

Las visualizaciones en GRC son útiles para hacer un estudio en tiempo real o para una detección de RFI a simple vista. Para hacer estudios más robustos y estadísticos es más práctico a través de algún lenguaje de programación. Para esto último se creó un código en python, que carga el archivo de los datos guardados del barrido, y da la posibilidad de manipularlos para su tratamiento.

Los resultados del barrido de frecuencias se muestran en la figura 5.1. Gráficos del espectro de frecuencia, que permite caracterizar las señales en ancho de banda y potencia; y del espectro dinámico, que permite caracterizar las señales en tiempo, es decir, determinar si éstas son permanentes, si aparecen de manera intermitente o si aparecen a manera de pulsos, se presentan para las 4 ventanas escaneadas. Los gráficos de frecuencia son espectros medidos en un instante de tiempo; por su parte los gráficos del espectro dinámico cubren un rango de 20 segundos.

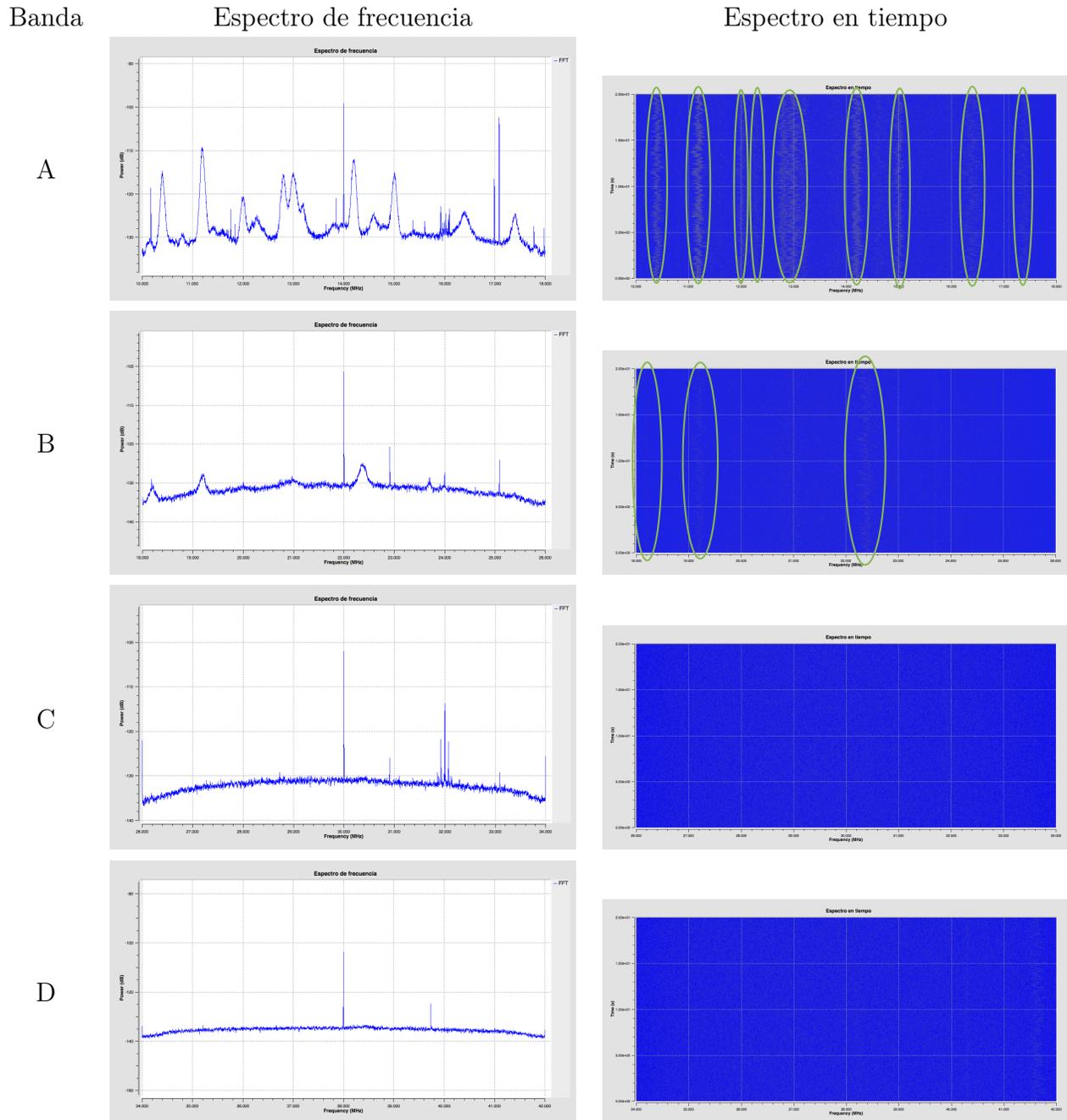


Figura 5.1: Gráficos de frecuencia y tiempo de las bandas escaneadas en el barrido de frecuencias. Las señales de RFI están señaladas en el espectro de tiempo.

Los espectros de la figura 5.1 dejan ver que hay una señal siempre al centro de cada ventana y otras señales espúreas, es de aclarar que la señal al centro del espectro es un efecto instrumen-

tal y al igual que las señales espúreas, no afecta a las señales de interés reales ni en la potencia ni ancho de banda medidos.

Para determinar la presencia de señales de RFI se siguieron dos métodos: el primero, mediante una inspección visual de los gráficos (en tiempo real y fuera de tiempo real, en el entorno de GRC), esto ya que las señales de RFI resultaron ser sobresalientes por su nivel de potencia respecto al piso de ruido. El segundo, una detección de RFI más robusta, se realizó mediante un algoritmo de detección escrito en python que determina la desviación estandar,  $\sigma$ , para todo los canales a un mismo tiempo, y cuando el nivel de potencia de la señal en el canal es mayor o igual a  $5\sigma$ , es marcada como RFI. Este código se muestra en el apéndice ??.

Las señales de RFI encontradas están marcadas en el espectro dinámico de la figura 5.1, encerradas en ovalos, y son distinguibles también en el espectro de frecuencia. Se puede ver que las ventanas A y B tienen presencia de RFI, mientras que las ventanas C y D se encuentran libres de estas interferencias. Específicamente se detectaron 11 señales de RFI en la ventana A y 3 señales en la ventana B. La tabla 5.1 muestra las detecciones encontradas en el barrido espectral para cada ventana; la columna 1 muestra el nombre y rango de la banda, la columna 2 el número de señales detectadas y la columna 3 la frecuencia central de estas señales.

Ventana	No. detecciones	Frecuencia (MHz)
A (10-18 MHz)	11	10.4, 11.2, 12.0, 12.3, 12.8, 13.0, 13.2, 14.2, 15.0, 16.4, 17.4
B (18-26 MHz)	3	18.2, 19.2, 22.3
C (26-34 MHz)	0	-
D (34-42 MHz)	0	-

Tabla 5.1: Detecciones de RFI en las 4 ventanas escaneadas.

Estos resultados fueron comparados con lo que se obtuvo antes en el escaneo analógico, y se encontró que los espectros pertenecen a las mismas señales. Como se indica en la sección 4.6.1, se tenían las ventanas C y D libres de RFI, mismo resultado que se obtuvo con el sistema construido basado en la SDR; y las ventanas A y B detectan las mismas señales que en el escaneo

hecho con el FS300.

Una vez detectadas las señales de RFI en las bandas escaneadas, se midió su potencia y ancho de banda. Esto se realizó de modo manual para cada señal. El analizador de espectros programado en GRC permite ver el nivel medio, máximo y mínimo del espectro, por lo que se midió la potencia media y máxima, así como el ancho de banda que pueden tener las señales de RFI encontradas en ambos casos. La potencia se calculó en unidades de dBm con base a la calibración descrita en la sección 4.5. Los resultados de estas medidas se muestran en las tablas 5.2 y 5.3, y el espectro de frecuencia medio y máximo para las ventanas A y B (donde se detectó RFI) se muestran en la figura 5.2.

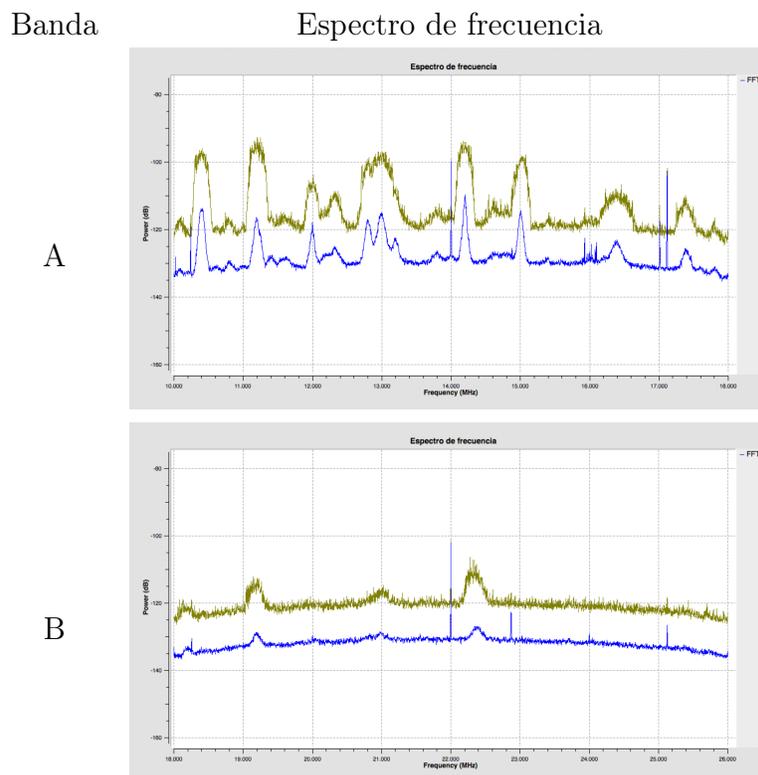


Figura 5.2: Espectro de frecuencias medio (azúl) y máximo (verde) para las ventanas donde se encontró RFI.

Ventana A				
<i>frecuencia</i> ( <i>MHz</i> )	$BW_{med}$	$BW_{max}$	$P_{med}$	$P_{max}$
	(kHz)		(-dBm)	
10.4	113	227	114.3	97.3
11.2	114	268	116.6	94.8
12.0	74	178	119.3	106.6
12.3	122	162	125.5	109.8
12.8	89	503	117.3	98.5
13.0	162		117.3	
13.2	97		122.6	
14.2	81	228	110	95.5
15.0	89	227	114.8	99
16.4	163	357	123.8	109.8
17.4	114	227	125.8b	111.8

Tabla 5.2: Frecuencia, ancho de banda y potencia de la RFI encontrada en la ventana A.

Ventana B				
$frecuencia$ ( $MHz$ )	$BW_{med}$	$BW_{max}$	$P_{med}$	$P_{max}$
	(kHz)		(-dBm)	
18.2	138	171	133.3	121.3
19.2	106	219	129.1	114.5
22.3	154	260	127.3	111.3

Tabla 5.3: Frecuencia, ancho de banda y potencia de la RFI encontrada en la ventana B.

De esta manera, se tienen caracterizadas en frecuencia, ancho de banda y potencia cada señal detectada, además, se puede establecer que las señales de RFI detectadas están, en principio, presentes de manera permanente. Aunque para determinar esto último es necesario hacer un monitoreo constante del espectro, los escaneos realizados en diferentes horarios y fechas permiten hacer esta declaración.

Un resultado más se obtiene al analizar el espectro escaneado. Dentro del rango frecuencial estudiado existen 3 bandas de uso asignado a la radioastronomía, mostradas en la tabla 5.4. Las 3 bandas fueron escaneadas y se encontró que estas 3 bandas de asignación para radioastronomía están libres de RFI, al menos con potencia por encima de  $\sim -140$  dBm, por lo que se espera que estudios realizados en estas frecuencias no se encuentren perjudicados por efectos de este tipo. La figura 5.3 muestra el espectro obtenido de las 3 bandas, señalado en un recuadro. Se puede ver que las bandas se encuentran libres de RFI.

Banda asignada (MHz)	Servicio asignado
13.36-13.41	Radioastronomía y fijo
25.55-25.67	Radioastronomía
37.5-38.25	Radioastronomía, móvil y fijo

Tabla 5.4: Bandas asignadas a radioastronomía en México entre los 10 y 40 MHz.

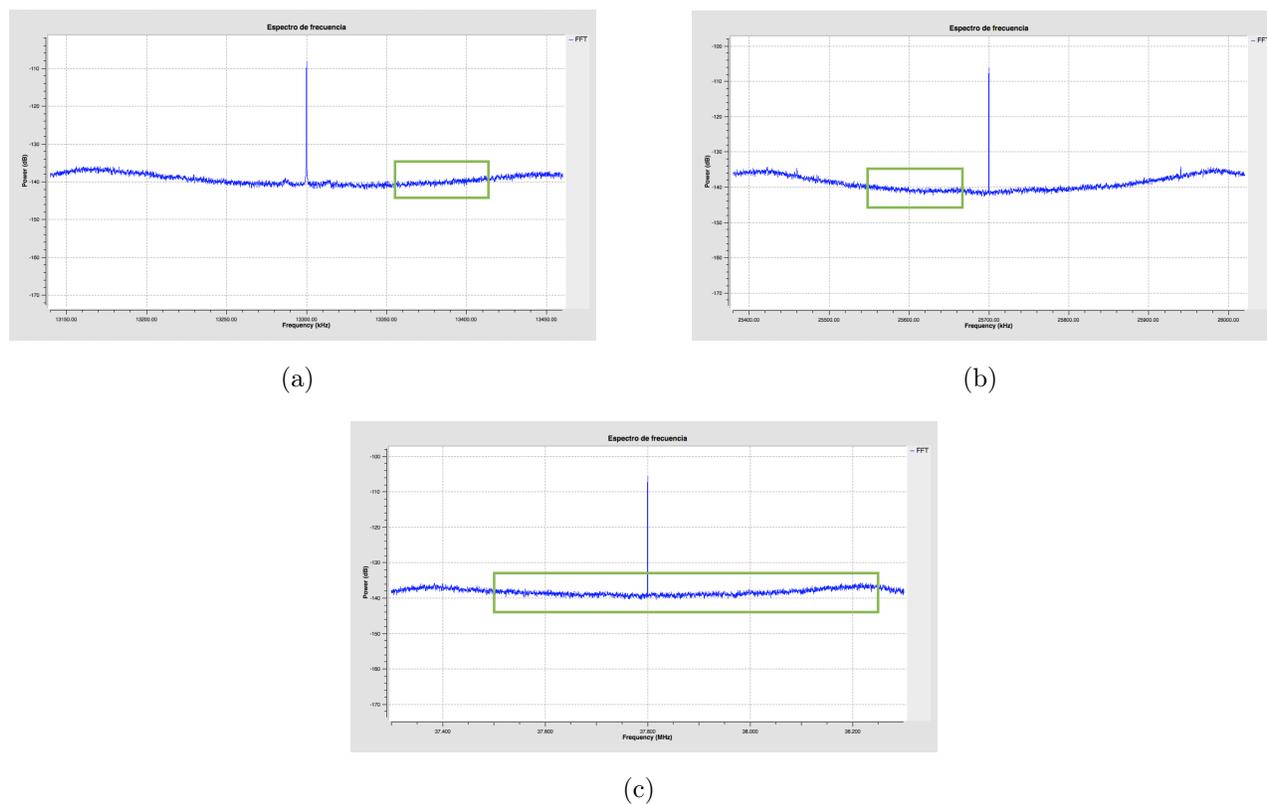


Figura 5.3: Bandas del radioespectro asignadas al uso de la radioastronomía de (a) 13.36-13.41 MHz, (b) 25.55-25.67 MHz y (c) 37.5-38.25 MHz, marcadas en recuadro.



## Capítulo 6

# Barrido analógico direccional

Como se describe en los capítulos 2 y 3, ubicar las fuentes que producen RFI resulta útil para tomar medidas con el fin de minimizar los efectos que éstas producen en las observaciones de radioastronomía. Un camino para determinar la ubicación de las fuentes de RFI es usar antenas direccionales para hacer estudios de detección y monitoreo de RFI, por las propiedades de este tipo de antenas, también descritas en el capítulo 3.

El tipo de antena que se adapta a las características que requiere el estudio que se ha realizado en este trabajo es del tipo LPDA (descrito en el capítulo 3). Sin embargo, las características de su diseño hacen que, al momento de realizar esta tesis, no nos sea posible construirla o comprarla. Uno de los principales impedimentos de construir dicha antena son sus dimensiones: por el rango de frecuencias que se estudian en esta tesis, el tamaño de esta antena LPDA resulta en 15 m para el elemento más largo y un total de 15 elementos distribuidos a lo largo de otros 12 m. Actualmente existen grupos trabajando en la optimización de estas antenas para reducir sus dimensiones y mejorar sus capacidades, sin embargo optimizar un diseño para una antena de este tipo se desvía del propósito de este trabajo de tesis.

Por tal motivo, con propósito de mostrar al lector un protocolo de barrido para RFI de forma direccional, hemos utilizado una antena LPDA que se ha podido conseguir. El estudio sin embargo, se ha hecho en el rango de 1.0-3.0 GHz, por las características de los instrumentos que utilizamos y que se describen en la siguiente sección.

## 6.1. Protocolo de barrido direccional

La antena utilizada para el barrido direccional es del tipo LPDA. Se trata de la antena *HyperLOG 30350* de AARONIA AG [1], cuyo rango de operación va de 350 MHz a 35 GHz. El espectro de frecuencia se obtuvo con el analizador de espectros *FS300* de Rohde&Schwarz [48]. Las tablas 6.1 y 6.2 muestran las características principales de la antena y el analizador respectivamente.

Antena HyperLOG 30350	
Tipo	Periódico logarítmico
Rango de frecuencia	350 Mhz -35 GHz
Impedancia	50 $\Omega$

Tabla 6.1: Características principales de la antena HyperLOG 30350 de AARONIA AG.

Analizador de espectros FS300	
Rango de frecuencia	9 kHz - 3 GHz
RBW	1 MHz - 1 Hz
VBW	1 MHz - 10 Hz
Span	1 kHz - 3 GHz
DANL	Hasta -120 dBm

Tabla 6.2: Características principales del Analizador de espectros FS300 R&S.

Para realizar el protocolo de barrido se determinó primero: de acuerdo con el diagrama de radiación de la antena mostrado en la figura 6.1, realizar el barrido direccional apuntando la antena directamente en los 4 puntos cardinales: norte, sur, este y oeste; ya que la cobertura del haz principal de la antena permite cubrir un ángulo de hasta  $90^\circ$  sin pérdidas mayores a 6 dB; y segundo: ya que, de acuerdo nuevamente con la figura 6.1, las propiedades direccionales de la antena disminuyen con la frecuencia y que el rango de operación del analizador de espectros cubre hasta los 3 Ghz, realizar el estudio cubriendo un rango de frecuencias de 1.0-3.0 GHz, dividiendo éste en 4 ventanas de 500 MHz de ancho: 1.0-1.5, 1.5-2.0, 2.0-2.5 y 2.5-3.0 GHz, (llamadas ventanas *a*, *b*, *c* y *d* respectivamente).

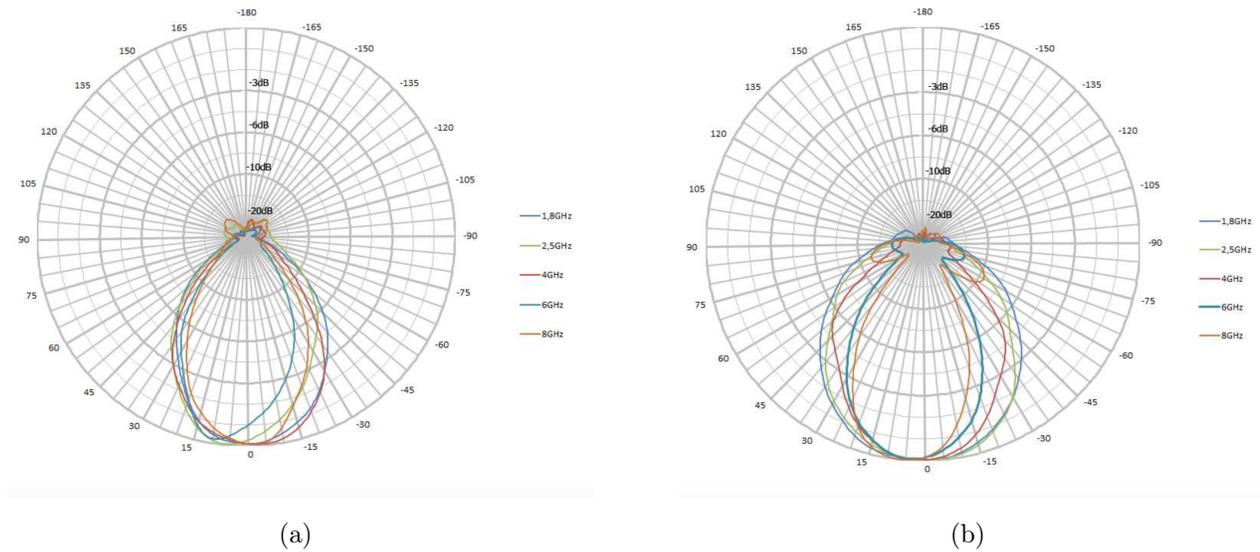
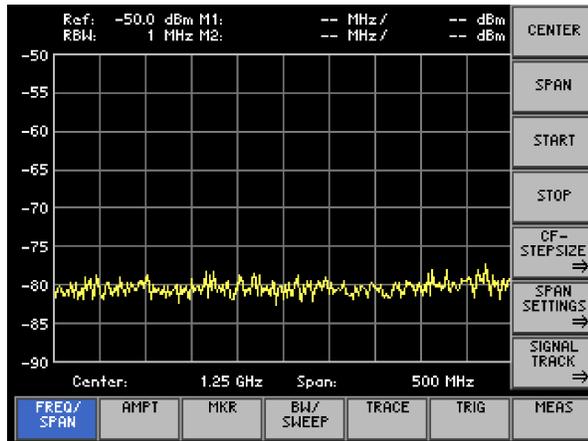


Figura 6.1: Patrón de radiación horizontal (a) y vertical (b) de la antena HyperLOG 30350. Obtenido de [1].

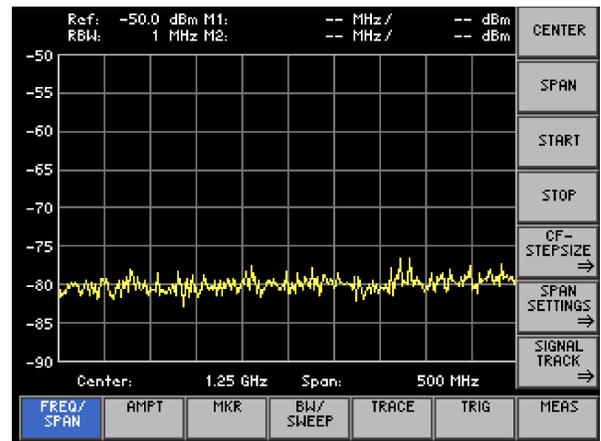
El barrido se realizó en los 4 puntos seleccionados con el máximo RBW que permite el FS300 (1 MHz) para asegurarnos de tener a la entrada toda la potencia de las señales que se detecten, y el VBW se eligió también a 1 MHz. Esto da un piso de ruido del analizador de  $\sim -80$  dBm y un ST de 25 ms. La figura 6.2 muestra la antena y analizador dispuestos para el escaneo. El resultado del barrido direccional se muestra en las figuras 6.3 - 6.6, donde se puede observar las 4 ventanas escaneadas para las 4 orientaciones seleccionadas.



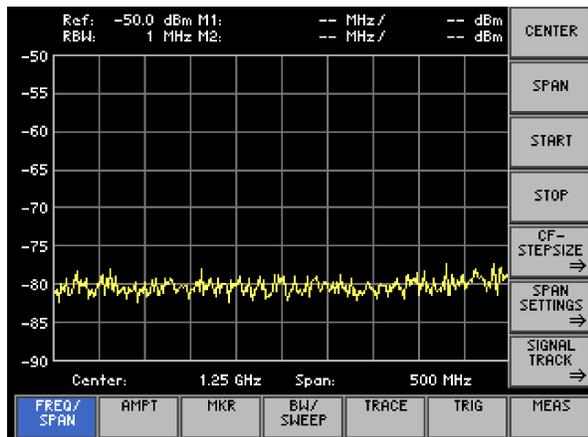
Figura 6.2: Antena y analizador de espectros usados para el barrido direccional.



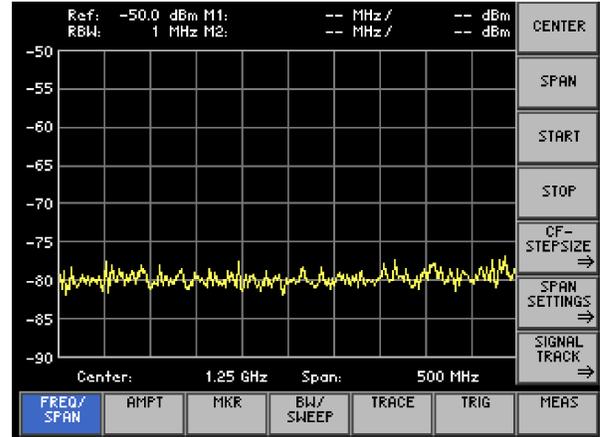
(a) norte



(b) sur

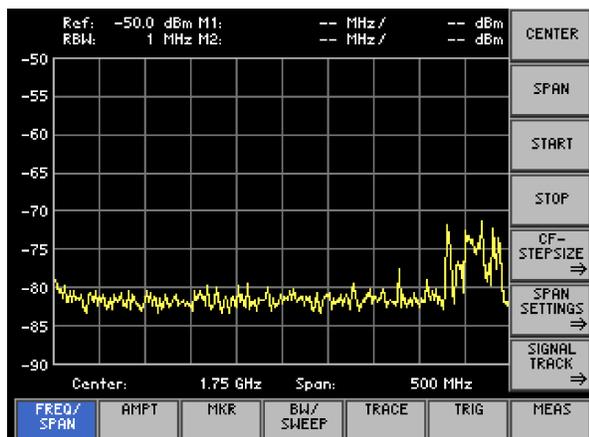


(c) este

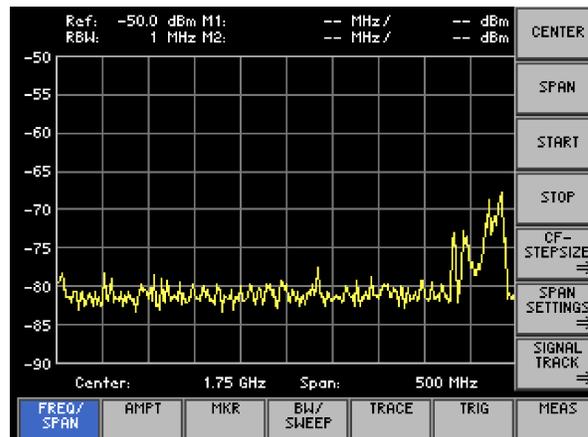


(d) oeste

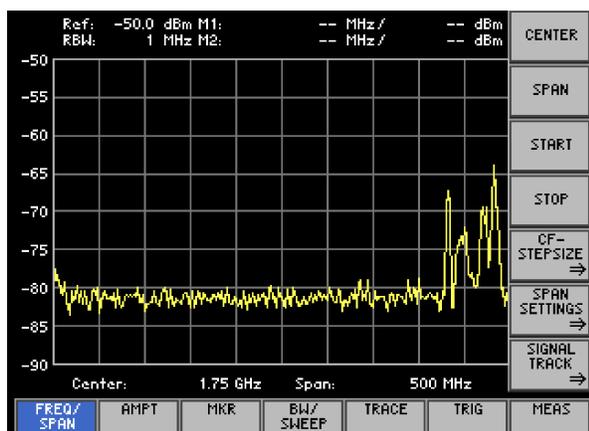
Figura 6.3: Espectro obtenido de la banda de 1.0-1.5 GHz en las 4 direcciones escaneadas.



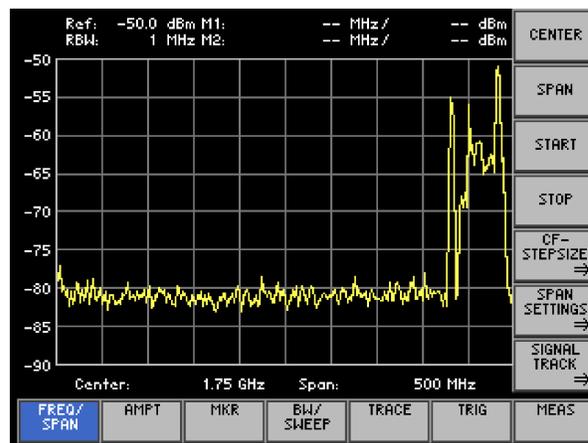
(a) norte



(b) sur

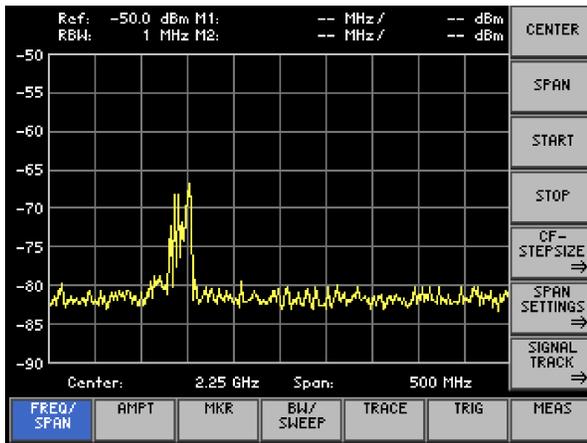


(c) este

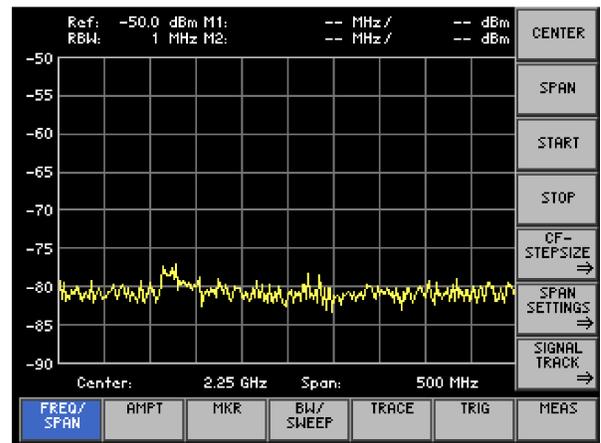


(d) oeste

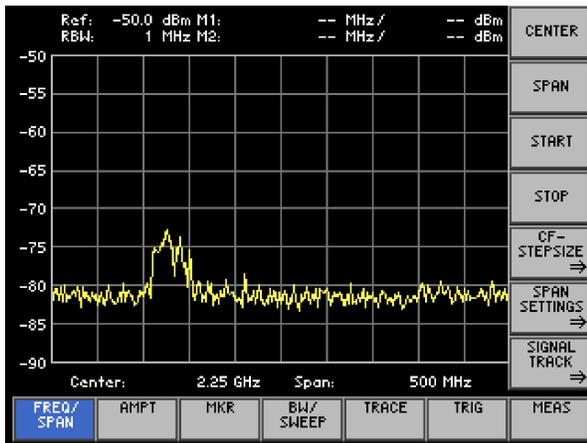
Figura 6.4: Espectro obtenido de la banda de 1.5-2.0 GHz en las 4 direcciones escaneadas.



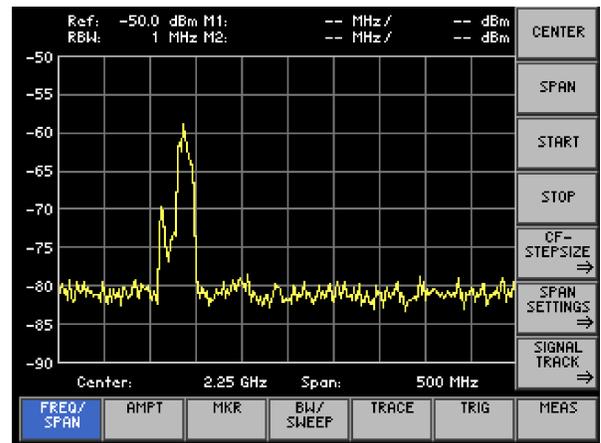
(a) norte



(b) sur

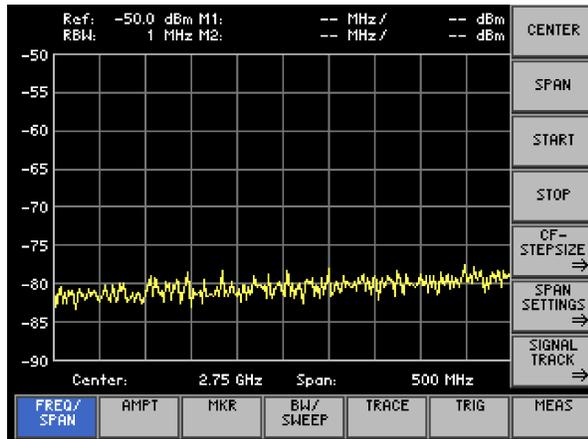


(c) este

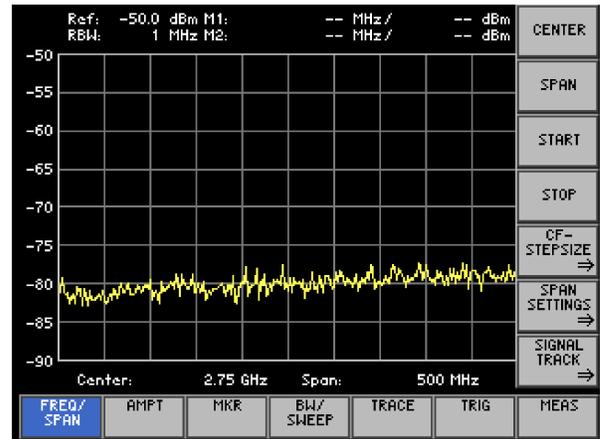


(d) oeste

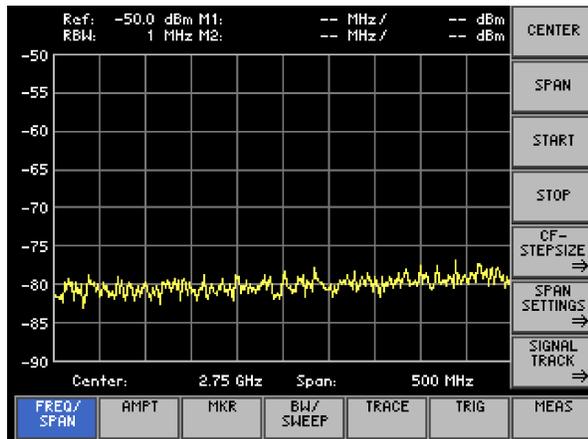
Figura 6.5: Espectro obtenido de la banda de 2.0-2.5 GHz en las 4 direcciones escaneadas.



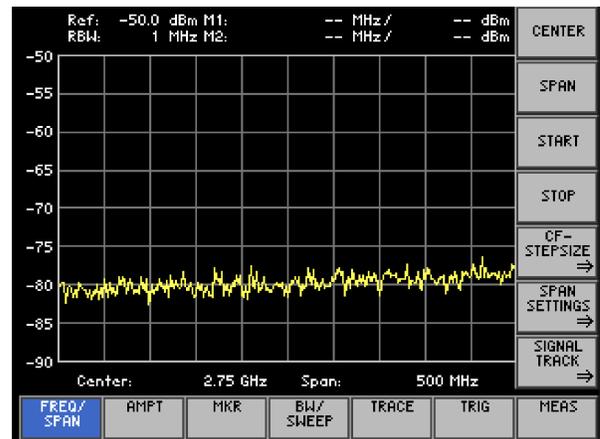
(a) norte



(b) sur



(c) este



(d) oeste

Figura 6.6: Espectro obtenido de la banda de 2.5-3.0 GHz en las 4 direcciones escaneadas.

El resultado de este barrido arrojó que existen señales en las bandas de las ventanas *b* y *c* (de 1.5-2.0 y 2.0-2.5 GHz respectivamente), y además en las 4 direcciones hacia donde se orientó la antena. Por otro lado, en las ventanas *a* y *d* no se encontraron señales en ninguna de las direcciones escaneadas. Una cosa más que se puede observar es que la RFI aparece en el mismo rango de frecuencias en las 4 direcciones.

La figura 6.4 permite ver que la potencia de las señales dentro de la ventana *b* es mayor en la dirección oeste y menor en la dirección norte. Una mirada hacia las señales de esta ventana muestra que ocupan un ancho de banda aproximado de 80 MHz centrado en  $\sim 1.9$  GHz, y que se trata de más de una señal. Esto se puede ver con mayor claridad en el espectro oeste, donde

las señales son más fuertes.

Para las señales detectadas en la ventana  $c$ , la figura 6.5 muestra que la potencia de las señales es mayor en la dirección oeste y menor en la dirección sur. Cuando miramos las señales encontradas en esta ventana podemos ver que se trata de por lo menos 2 señales diferentes ocupando un ancho de banda total de aproximadamente 50 MHz, centrado en  $\sim 2.1$  GHz.

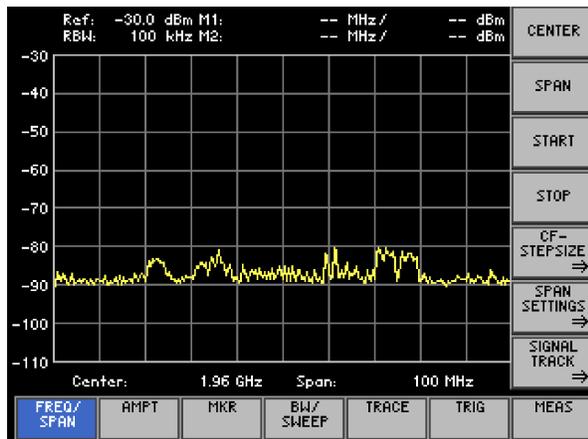
Con base en estos resultados se determinó realizar un segundo barrido para caracterizar las señales encontradas. El nuevo escaneo se hizo en las ventanas  $b$  y  $c$ , e igual que antes en las 4 direcciones, pero esta vez con un span de 100 MHz, centradas en 1.96 y 2.13 GHz respectivamente. Ahora el VBW se eligió a 20 kHz, el mínimo que permite el analizador, y el RBW se eligió a 100 kHz. La potencia, frecuencia y ancho de banda de las señales encontradas se midieron con el analizador de espectros. Los espectros resultantes del segundo barrido se muestran en las figuras 6.7 y 6.8, las tablas 6.3 - 6.10 muestran los valores obtenidos de frecuencia, potencia y ancho de banda de las señales identificadas en cada ventana.

Ventana $b$ , Norte		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
1.933	5	83
1.945	10	82
1.969	2	82
1.972	2	80
1.983	5	80
1.988	5	81

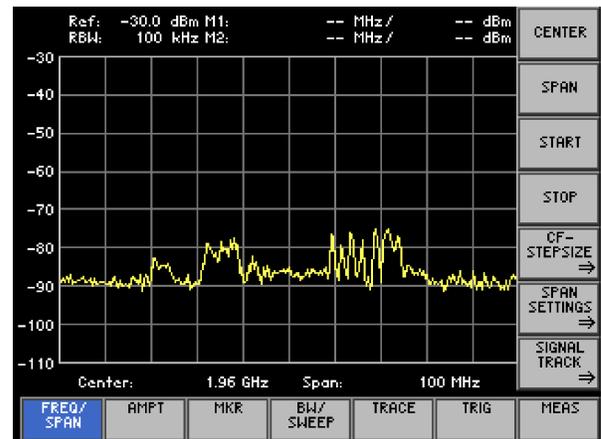
Tabla 6.3: Señales encontradas en el espectro norte de la ventana  $b$ . La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.

Ventana $b$ , Sur		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
1.933	5	82
1.945	10	79
1.952	4	82
1.969	2	77
1.972	2	80
1.974	2	76
1.976	2	79
1.978	2	75
1.983	5	75

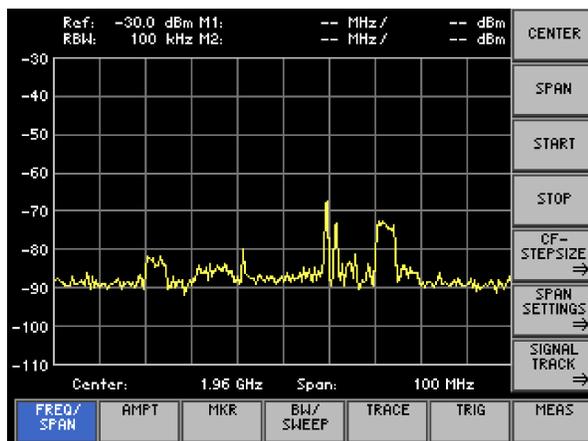
Tabla 6.4: Señales encontradas en el espectro sur de la ventana  $b$ . La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.



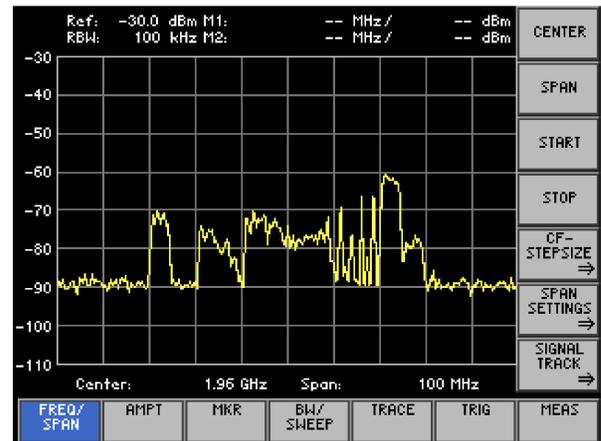
(a) norte



(b) sur



(c) este



(d) oeste

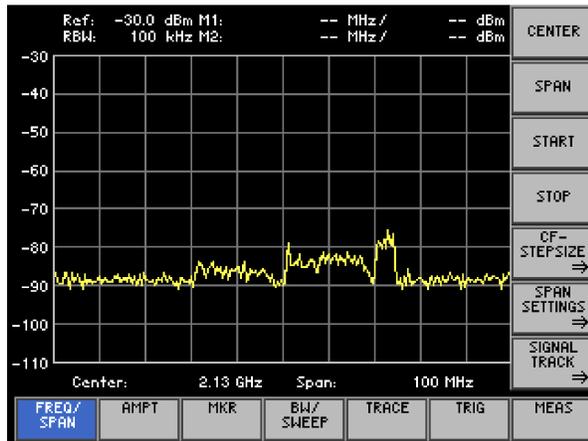
Figura 6.7: Señales a 1.96 GHz. RBW=100 kHz.

Ventana <i>b</i> , Este		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
1.933	5	82
1.945	10	85
1.951	2	80
1.969	2	68
1.972	2	73
1.974	4	82
1.983	5	72
1.988	5	85

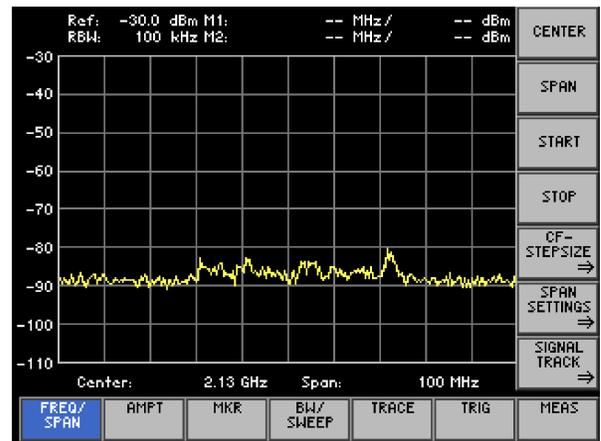
Tabla 6.5: Señales encontradas en el espectro este de la ventana *b*. La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.

Ventana <i>b</i> , Oeste		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
1.933	5	70
1.945	10	74
1.96	20	70
1.972	2	70
1.974	2	76
1.976	2	65
1.978	2	65
1.983	5	60
1.988	5	78

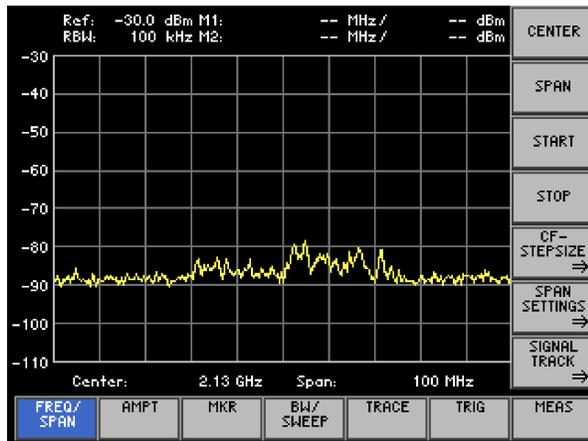
Tabla 6.6: Señales encontradas en el espectro oeste de la ventana *b*. La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.



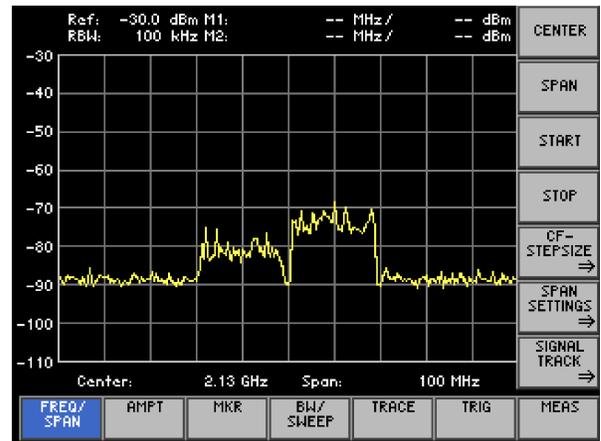
(a) norte



(b) sur



(c) este



(d) oeste

Figura 6.8: Señales a 2.13 GHz. RBW=100 kHz.

Ventana <i>c</i> , Norte		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
2.120	20	85
2.140	20	82
2.153	5	78

Tabla 6.7: Señales encontradas en el espectro norte de la ventana *c*. La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.

Ventana <i>c</i> , Sur		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
2.153	3	81

Tabla 6.8: Señales encontradas en el espectro sur de la ventana *c*. La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.

Ventana <i>c</i> , Este		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
2.133	5	80
2.140	6	82
2.147	4	83
2.153	2	81

Tabla 6.9: Señales encontradas en el espectro este de la ventana *c*. La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.

Ventana <i>c</i> , Oeste		
<i>frecuencia</i> (MHz)	<i>BW</i> (MHz)	<i>P</i> (-dBm)
2.120	20	79
2.140	20	72

Tabla 6.10: Señales encontradas en el espectro oeste de la ventana *c*. La frecuencia, el ancho de banda y la potencia medidas se muestran para cada señal.

Una vez que se realizó el segundo barrido y se identificaron las frecuencias de las señales encontradas y la dirección donde se tiene mayor potencia de éstas, buscamos las posibles fuentes que estarían generando la interferencia. Encontramos que la red móvil de 3G y 4G de diversas compañías celulares opera a 1900 y 2100 MHz respectivamente. La figura 6.9 muestra el mapa de torres celulares alrededor de la zona de estudio (marcada con un círculo rojo) y deja ver que hay varias torres de estas en la zona. Las marcas color naranja con la letra U en el mapa corresponden a antenas UMTS, que dan cobertura 3G; las marcas azul con la letra L corresponden a antenas LTE, que dan cobertura 4G.

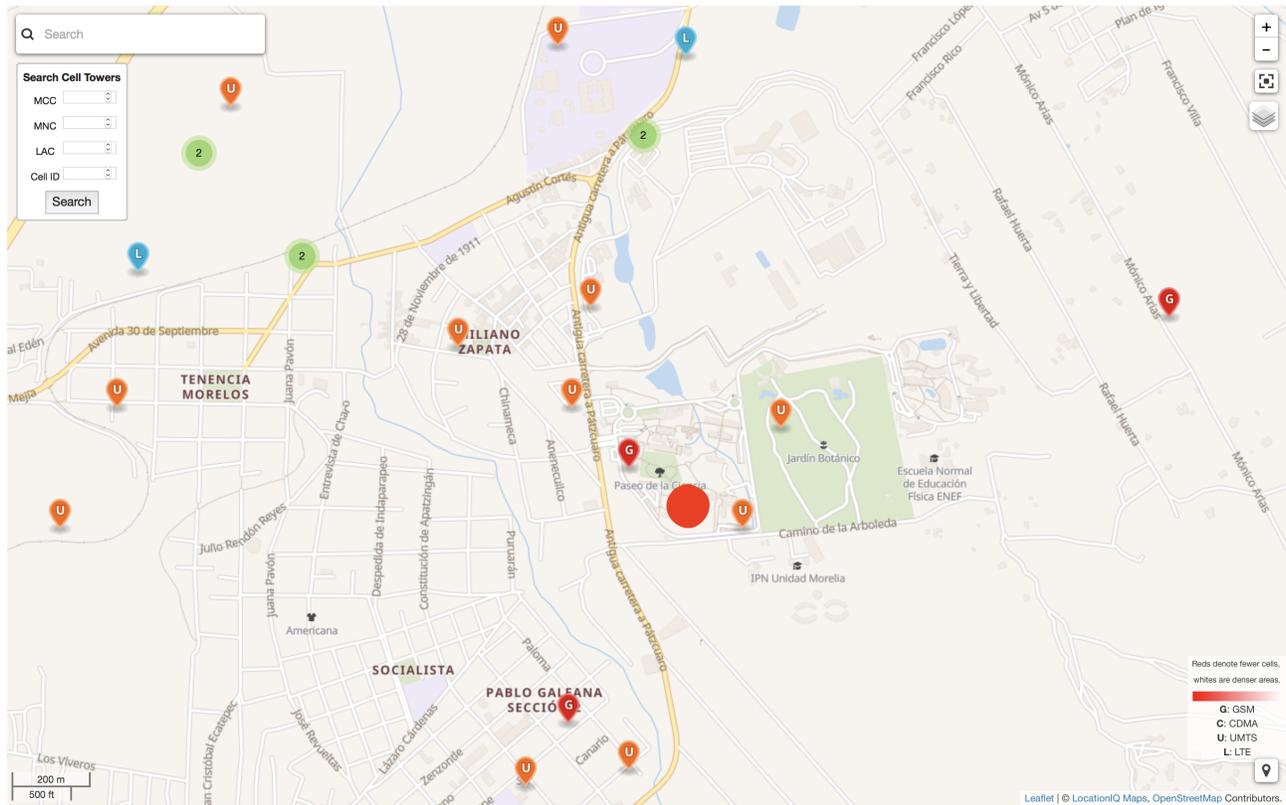


Figura 6.9: Mapa de torres celulares en la zona de estudio. Obtenido de <https://opencellid.org/#zoom=16&lat=19.6499&lon=-101.23359>

Este mapa muestra que una torre de 4G se encuentra en dirección noroeste y otra en dirección norte, lo cual está en correspondencia con la dirección de mayor potencia recibida de las señales a  $\sim 2.1$  GHz, ya que, como muestra la figura 6.5, se tiene mayor potencia en el espectro oeste y después en el espectro norte, además de que las señales en el espectro sur son las más débiles. También se puede apreciar que las torres de 3G están distribuidas preferentemente hacia el oeste, aunque las más cercanas a la zona donde se colocó la antena que hizo el barrido están al este, dirección donde se tiene casi la mayor potencia recibida. Los espectros de la figura 6.4 dejan ver que las señales a  $\sim 1.9$  GHz tienen potencia en todas las direcciones escaneadas, correspondiente con la distribución de las torres.

Adicional a esto, verificamos que, en el CNAF, la banda desde 1700 hasta 2690 MHz está asignada al servicio móvil.

Con base en esto, podemos decir que las señales encontradas en las ventanas escaneadas  $b$  y  $c$  a  $\sim 1.9$  y  $2.1$  GHz provienen de las torres UMTS y LTE que dan cobertura 3G y 4G.

## Capítulo 7

### Análisis y recomendaciones

Una vez que se identificaron las señales de RFI en el rango de frecuencias completo, se debe establecer cómo proceder ante su presencia. En primer lugar, hicimos una búsqueda de dispositivos dentro del campus (donde se realizó el estudio) que operan por ondas de radio, de los cuales podemos saber su frecuencia exacta y determinar si las señales encontradas pertenecen a éstos. Las fuentes que identificamos fueron: un aparato de alerta sísmica, los comunicadores portátiles de 2 vías que usa el personal del campus y los router de Wifi. Sin embargo, hallamos que ninguno de estos aparatos tiene su frecuencia de operación dentro del rango de frecuencias escaneado. Encontramos que la radio de alerta sísmica opera entre 162.400 - 162.550 MHz, los radios de 2 vías que se usan dentro del campus operan en dos bandas, uno entre 146.1 - 174 MHz y otro entre 440 - 470 MHz, y el Wifi es de 2.4 y 5 GHz, los 14 canales del Wifi a 2.4 GHz están siendo usados y 3 del Wifi a 5 GHz. La tabla 7.1 muestra estos dispositivos y sus frecuencias.

Dispositivo	Banda de operación
Alerta sísmica	162.400 - 162.550 MHz
Radio portátil 2 vías	146.1 - 174 MHz y 440 -470 MHz
Wi-Fi	2.402 - 2.472 GHz y 5.180 - 5.240 GHz

Tabla 7.1: Dispositivos de radio identificados dentro del campus y sus frecuencias de operación.

Ya que ninguno de los dispositivos identificados tiene su frecuencia de operación en las bandas donde detectamos RFI hicimos uso del CNAF para determinar el servicio al que es asignada

cada banda donde tenemos presencia de estas señales de interferencia. La tabla 7.2 muestra la asignación de servicios, de acuerdo con el CNAF, en bandas donde tuvimos detección de RFI. La columna 1 muestra los límites de la banda asignada y la columna 2 los servicios a los cuales es asignada dicha banda.

Banda asignada (MHz)	Señal encontrada (MHz)	Servicio asignado
10.15-11.175	10.4	fijo y móvil, salvo móvil aeronáutico
11.175-11.275	11.2	móvil aeronáutico
11.6-12.1	12.0	radiodifusión
12.23-13.2	12.3, 12.8, 13.0	móvil marítimo
13.2-13.26	13.2	móvil aeronáutico
14-14.25	14.2	aficionados y aficionados por satélite
14.99-15.01	15.0	frecuencias patrón
16.36-17.41	16.4, 17.4	móvil marítimo
17.48-17.9	17.4	radiodifusión
18.168-18.78	18.2	fijo y móvil, salvo móvil aeronáutico
19.02-19.68	19.2	fijo
22-22.855	22.3	móvil marítimo

Tabla 7.2: Servicio asignado por el IFT en las bandas donde se detectó RFI.

En el rango frecuencial entre  $\sim 10$  y 23 MHz, se tienen 8 diferentes servicios asignados. Comenzando por el servicio fijo, que de acuerdo a la UIT se refiere a un servicio de radiocomunicación entre dos puntos fijos. Ejemplo de esto lo son las antenas repetidoras de señales. Los servicios móviles son entre estaciones móviles y terrestres o entre estaciones móviles. Servicios marítimo y aeronáutico entran en esta categoría. El servicio de radiodifusión es para emisiones de señales, como la radio AM y FM. El servicio de frecuencias patrón está destinado para la transmisión de frecuencias específicas para servicios técnicos. Finalmente el servicio para aficionados está destinado a la intercomunicación entre personas debidamente autorizadas, incluyendo el uso de estaciones satelitales.

De entre todos estos servicios, posibles fuentes de origen de la RFI que se encontró, podemos descartar en principio, al servicio móvil marítimo y aeronáutico, pues las transmisiones

---

de estos servicios están fuera del rango de alcance para detectarlas. Por otro lado, creemos que cualquiera de los demás servicios podría estar generando las señales que se detectaron. Los radioaficionados, por ejemplo, podrían estar invadiendo frecuencias más allá de las asignadas por el CNAF.

Como se menciona en el capítulo 2, estudios del ambiente electromagnético y la ocupación del radio espectro se hacen por dos razones principales: determinar la viabilidad de un sitio para la colocación de un radiotelescopio y/o determinar las mejores frecuencias para realizar observaciones de radioastronomía. Para este caso, el arreglo dipolar ya se encuentra instalado, por lo que nuestro estudio sirve para determinar las mejores frecuencias para realizar observaciones de radioastronomía en el rango frecuencial de operación de los dipolos.

Para tal propósito, los resultados obtenidos hasta este punto permiten ya dar una serie de recomendaciones, de manera similar a las recomendaciones para observaciones de radioastronomía que emite la UIT, para el sitio estudiado.

La banda de 10-18 MHz presenta una fuerte ocupación, con señales de potencia máxima de hasta -95 dBm, sin embargo, la banda de 13.36-13.41 MHz, asignada para radioastronomía se encuentra libre de señales. Podemos declarar que esta banda es ahora utilizable para observaciones de radioastronomía, pero con ciertas precauciones, ya que, como se ve en la tabla 5.4, la banda se comparte con el servicio fijo de radiocomunicación, por lo que legalmente ésta se puede ocupar en cualquier momento.

La banda de 18-26 MHz presenta una ocupación menor en comparación a la anterior, solo 3 señales de RFI fueron encontradas y con potencias de  $\sim 20$  dBm de diferencia por debajo. En esta ventana se encuentra también una banda asignada a la radioastronomía de manera exclusiva, de 25.55-25.67 MHz, que se encontró libre de RFI. Podemos declarar que esta banda es ahora utilizable para observaciones de radioastronomía. Ya que la banda está asignada únicamente al servicio de radioastronomía, es de esperar que ninguna señal de RFI entre intencionalmente, sin embargo el espectro siempre es vulnerable a interferencia, y ante esta eventualidad, la radioastronomía puede proceder de manera legal para eliminar cualquier fuente de RFI que esté generando señales dentro de la banda.

Las bandas de 26-34 y 34-42 MHz no presentan ocupación, por lo que podemos declarar que

este rango completo de 16 MHz es ahora utilizable para estudios radioastronómicos. De igual manera, una banda asignada por la UIT al servicio de la radioastronomía se encuentra dentro de una de las ventanas estudiadas, de 37.5-38.25. Esta banda se comparte con los servicios móvil y fijo de radiocomunicación, por lo que al igual que ocurre con la primera banda, podemos declarar que ésta es ahora utilizable para observaciones de radioastronomía, pero con precauciones.

Una última recomendación es para el momento de realizar observaciones. Un monitoreo anterior a la fecha de observación ayudará a establecer si las bandas siguen libres, y en caso contrario a proceder de manera conveniente sin entorpecer el trabajo. Por otro lado, un monitoreo constante del espectro alrededor de la frecuencia de observación, a la vez que se realiza ésta, ayudará a la detección de RFI, en caso de que se presente de manera espontánea.

# Capítulo 8

## Conclusiones y trabajo a futuro

### 8.1. Conclusiones

La presencia de RFI representa un problema creciente para la radioastronomía, que demanda la creación de sistemas de monitoreo del espectro radioeléctrico para la detección de señales de interferencia, además de metodologías para minimizar o anular los efectos de estas señales en los datos radioastronómicos.

A través del trabajo realizado pudimos darnos cuenta que la creación de sistemas de detección y monitoreo de RFI sigue representando un reto en el campo de la radioastronomía en varios aspectos, ya sea a través de métodos analógicos o digitales. Actualmente los métodos digitales están más inclinados a cubrir frecuencias bajas, por la necesidad de convertidores con frecuencias de muestreo del orden de GHz para cubrir estudios en estos rangos, y aunque ya existen algunos con estas características, mantienen costos bastante elevados, no siempre accesibles a toda la comunidad. Por otra parte, las variadas características que presenta la RFI demandan sistemas de detección que cubran todas estas características, algo que tampoco es fácil de obtener.

Para este trabajo hemos buscado atacar este problema de RFI en radioastronomía probando un método para la detección de RFI basado en la Radio Defina por Software, aplicable en el campo de la radioastronomía a frecuencias bajas. El estudio se realizó en el rango frecuencial de 10-42 MHz para el sitio del Instituto de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM ubicado en Morelia, Michoacán; con propósito de comprender los procesos y problemas de la detección

de RFI y con ello caracterizar el medio ambiente electromagnético a través de la creación de un sistema digital para detección de RFI y determinar la viabilidad de realizar observaciones radioastronómicas en el rango de frecuencias mencionado.

El sistema de detección de RFI construido consta de un arreglo de 4 antenas de dipolos cruzados en V-invertida, para recibir las señales de radiofrecuencia; 1 filtro pasa bajas que anula señales más allá del rango de estudio; el USRP-1, que lleva a cabo el procesamiento digital de las señales; y 1 PC, para el análisis y procesado de datos.

Con la implementación del sistema logramos detectar y caracterizar en frecuencia, ancho de banda y nivel de potencia las señales de RFI presentes en el rango frecuencial estudiado. Aunque el sistema tiene algunas limitantes, sobre todo que no podemos hacer un monitoreo de forma constante por la cantidad de datos que de ello resulta, y que ocupan demasiado espacio en disco, los resultados obtenidos muestran ya, que existe presencia de RFI en 2 de las 4 bandas estudiadas.

Basado en estos resultados que muestran presencia de RFI se pudo dar una serie de recomendaciones para posibles observaciones de radioastronomía en el sitio. La primera de éstas implica que las bandas donde se detectó RFI deben ser evitadas para hacer radio-observaciones, y que las ventanas donde no se detectó presencia de RFI pueden ser utilizadas bajo precaución de hacer un monitoreo permante de las bandas de observación.

Con el sistema creado también pudimos evaluar 3 bandas asignadas al campo de la radioastronomía por la UIT, encontrando que las 3 bandas están libres de RFI, por lo que pueden ser utilizadas para realizar radio-observaciones, nuevamente bajo precaución de hacer un monitoreo permante.

Se pudo comprobar entonces que el sistema digital construido para la detección de RFI funciona para el rango frecuencial objetivo, y con ello creemos que puede sustituir por completo el lugar de un analizador de espectros analógico para hacer el mismo estudio, como el que ya se encuentra en las instalaciones, que antes sería la primera opción para hacer un barrido del espectro.

Una última conclusión del trabajo es referente a la zona de observación. Ya que el estudio fue hecho en la ciudad de Morelia, en principio, el radiotelescopio instalado en el sitio se encuentra rodeado por señales radio-eléctricas, lo que puede conducir a pensar en la dificultad de hacer observaciones de radioastronomía. Sin embargo, nuestro estudio a frecuencias bajas revela que sí existen bandas libres de RFI, incluyendo las asignadas por la UIT, por lo que es posible llevar a cabo observaciones radioastronómicas. Una vez más, se debe enfatizar en un monitoreo de RFI constante para hacer este tipo de observaciones, además, una cosa más a tomar en cuenta será el estudio y determinación de una o más técnicas de mitigación y/o escisión de RFI, obligadas para cualquier radiotelescopio.

## 8.2. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro podemos diferenciar distintos objetivos:

i) Para caracterizar de manera más completa las señales de RFI presentes en el ambiente electromagnético del sitio de estudio:

- Adquirir y usar una antena direccional para determinar la ubicación espacial de las fuentes que producen las señales de RFI presentes, ya que las antenas usadas hasta ahora detectan señales casi isotrópicamente, por lo que no se puede determinar la dirección proveniente de la RFI encontrada.

- Realizar un monitoreo constante del espectro para determinar la presencia en tiempo de RFI, ya que una nueva señal de RFI puede surgir en cualquier instante, o una señal no permanente puede manifestarse en algún momento. Esto es recomendable realizar sobre todo, una vez que se ponga en marcha alguna observación en el sitio.

ii) Para hacer más accesibles al usuario los datos del monitoreo del espectro e identificación de señales obtenidos del sistema de detección:

- Crear un dominio de internet que sirva para guardar en una base de datos la información obtenida por el sistema de detección, y poder acceder y consultar éstos con una determinada antigüedad; y de la misma manera poder visualizar en tiempo real el escaneo de frecuencias, para que el usuario no necesite ir hasta el lugar donde se está recabando la información para acceder a ésta.

iii) Para hacer un barrido del espectro más amplio en frecuencias en el sitio:

- Aprovechar que las antenas utilizadas tienen un rango de operación hasta  $\sim 90$  MHz, y hacer un estudio más extenso con éstas. Esto se puede realizar por dos maneras: mediante la técnica de *muestreo pasa bandas*, que se describió en la sección 3.3.2; y a través de una *conversión en bajada* de las frecuencias altas. Para el caso del muestreo pasa bandas, se han calculado ya las frecuencias de muestreo que permiten realizar un escaneo cubriendo el rango desde los 10 hasta 90 MHz. Estos cálculos y una breve descripción de la conversión en bajada se muestran en el apéndice 9.6.

# Capítulo 9

## Apéndice

### 9.1. Conceptos y unidades útiles

**Decibel:** El decibel (dB) es una unidad de medida relativa adimensional para relaciones de potencia y otras cantidades. Matematicamente se expresa como

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}. \quad (9.1)$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son dos potencias cualesquiera.

También se utiliza para comparar valores de voltaje:

$$dB = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \quad (9.2)$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son voltajes. La potencia y el voltaje se relacionan entre si como:

$$P = V^2/R \quad (9.3)$$

Donde  $R$  típicamente es  $50 \Omega$ .

Dado que el decibel es una cantidad relativa, para poder medir una potencia absoluta en unidades de dB hay una serie de definiciones basadas en un determinado valor de referencia para  $P_2$ :

- dBW: decibeles relativos a vatios (W), donde se toma como referencia un W, de tal manera que  $1 \text{ W} = 0 \text{ dBW}$ .
- dBm: decibeles relativos a milivatios (mW), donde se toma como referencia un mW, de tal manera que  $1 \text{ mW} = 0 \text{ dBm}$ .
- dBi: decibeles relativos a un radiador isotropico.
- dBc: Nivel relativo a una señal portadora.
- dBd: decibeles relativos a una antena dipolo.

Se puede convertir la potencia de, por ejemplo, mW a dBm y viceversa mediante las relaciones

$$P_{mW} = 10^{P_{dBm}/10} \quad (9.4)$$

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} P_{mW} \quad (9.5)$$

**ERP y EIRP:** La ERP, potencia radiada efectiva, y la EIRP, potencia isotropica radiada efectiva, se definen como la potencia de transmisión más la ganancia de la antena transmisora, menos las pérdidas; diferenciándose en que la ganancia en la ERP es respecto a una antena dipolo y en la EIRP es respecto a una antena isotropica. Matematicamente se expresan

$$EIRP = P_T + G_{T(dBi)} - L_c \quad (9.6)$$

$$ERP = P_T + G_{T(dBd)} - L_c \quad (9.7)$$

donde  $P_T$  es la potencia de salida del transmisor en dBW o dBm,  $G_{T(dBi)}$  y  $G_{T(dBd)}$  es la ganancia de la antena transmisora en dBi y dBd respectivamente y  $L_c$  es la atenuación de la señal en el cable de transmisión en dB. Ambas se relacionan como

$$ERP = EIRP - 2.15 \quad (9.8)$$

**Plano E y H:** para una antena linealmente polarizada, el plano E es el que contiene el vector de campo electrico y el plano H el plano que contiene el vector de campo magnético, en la dirección de radiación máxima. Ambos planos son ortogonales entre si.

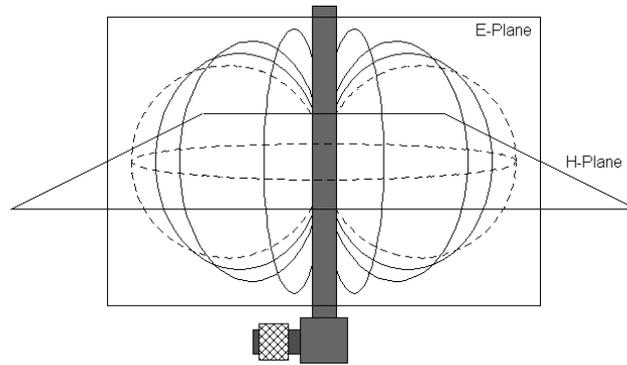


Figura 9.1: Representación de los planos E y H en el diagrama de una antena dipolo omnidireccional. (Tomada de [https://en.wikipedia.org/wiki/E-plane\\_and\\_H-plane](https://en.wikipedia.org/wiki/E-plane_and_H-plane))

## 9.2. Combinadores, filtro, Bias-Tee y coaxial.

Coaxial

# Power Splitter/Combiner

ZB4PD1-500+

4 Way-0° 50Ω 5 to 500 MHz



## Maximum Ratings

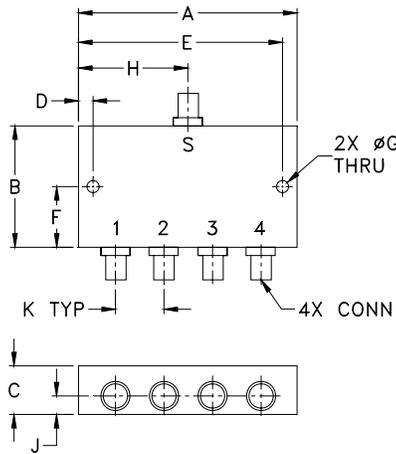
Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Power Input (as a splitter)	1W max.
Internal Dissipation	0.250W max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

## Coaxial Connections

SUM PORT	S
PORT 1	1
PORT 2	2
PORT 3	3
PORT 4	4

## Outline Drawing



## Outline Dimensions (inch/mm)

A	B	C	D	E	F	
3.50	2.13	.88	.150	3.350	1.06	
88.90	54.10	22.35	3.81	85.09	26.92	
G	H	J	K			wt
.125	1.75	.44	.89			grams
3.18	44.45	11.18	22.61			260

## Features

- wideband, 5 to 500 MHz
- high isolation, 34 dB typ.
- rugged, shielded case

## Applications

- VHF/UHF
- receivers/transmitters

SMA version shown  
CASE STYLE: UU188

Connectors	Model
BNC	ZB4PD1-500+
SMA	ZB4PD1-500-S+
N-TYPE	ZB4PD1-500-N+

+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

## Electrical Specifications

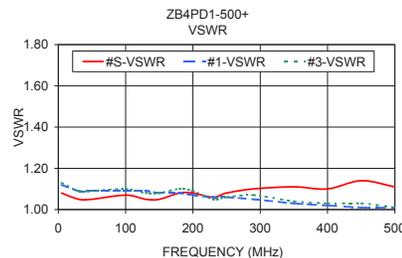
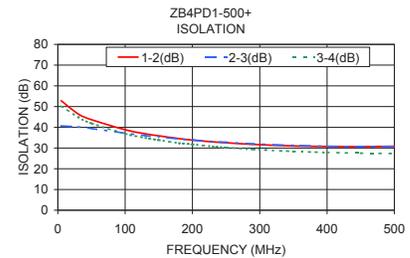
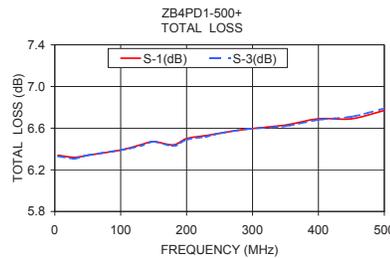
FREQ. RANGE (MHz)	ISOLATION (dB)			INSERTION LOSS (dB) ABOVE 6.0 dB			PHASE UNBALANCE (Degrees)			AMPLITUDE UNBALANCE (dB)		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
f <sub>L</sub> -f <sub>U</sub>	Typ.	Min.	Typ. Min.	Typ.	Max.	Typ. Max.	Typ.	Max.	Typ. Max.	Max.	Max.	Max.
5-500	34	20	34 20	28	20	0.4 1.0	0.5 0.9	0.9 1.5	1	3	6	0.2 0.2 0.4

L = low range [f<sub>L</sub> to 10 f<sub>L</sub>] M = mid range [10 f<sub>L</sub> to f<sub>U</sub>/2] U = upper range [f<sub>U</sub>/2 to f<sub>U</sub>]

## Typical Performance Data

Freq. (MHz)	Total Loss <sup>1</sup> (dB)				Amp. Unbal. (dB)	Isolation (dB)			VSWR S	VSWR 1	VSWR 2	VSWR 3	VSWR 4
	S-1	S-2	S-3	S-4		1-2	2-3	3-4					
5.00	6.34	6.35	6.33	6.33	0.01	52.83	40.68	50.23	1.08	1.12	1.12	1.13	1.13
30.00	6.32	6.32	6.31	6.32	0.01	46.48	40.23	44.89	1.05	1.09	1.09	1.09	1.09
50.00	6.34	6.34	6.34	6.35	0.01	43.68	39.45	41.92	1.05	1.09	1.09	1.09	1.10
100.00	6.39	6.39	6.39	6.38	0.01	38.83	37.13	36.88	1.07	1.09	1.10	1.10	1.10
130.00	6.44	6.43	6.43	6.43	0.01	36.86	35.97	34.90	1.05	1.09	1.08	1.08	1.08
150.00	6.47	6.46	6.47	6.46	0.01	35.87	35.35	33.83	1.05	1.08	1.08	1.08	1.08
180.00	6.44	6.44	6.43	6.43	0.01	34.55	34.35	32.40	1.08	1.08	1.09	1.10	1.10
200.00	6.50	6.51	6.49	6.48	0.03	33.82	33.88	31.75	1.08	1.07	1.07	1.09	1.09
230.00	6.53	6.54	6.52	6.51	0.03	32.96	33.12	30.74	1.06	1.06	1.04	1.05	1.05
250.00	6.55	6.56	6.55	6.53	0.03	32.54	32.76	30.22	1.08	1.06	1.06	1.06	1.06
290.00	6.59	6.59	6.59	6.58	0.02	31.75	32.00	29.34	1.10	1.05	1.05	1.07	1.07
350.00	6.63	6.64	6.62	6.60	0.04	31.02	31.24	28.37	1.11	1.03	1.04	1.04	1.04
400.00	6.69	6.72	6.68	6.67	0.05	30.73	30.84	27.85	1.10	1.02	1.01	1.03	1.03
450.00	6.69	6.72	6.71	6.67	0.05	30.66	30.70	27.53	1.14	1.01	1.01	1.03	1.03
500.00	6.77	6.81	6.79	6.75	0.06	30.85	30.77	27.37	1.11	1.01	1.02	1.01	1.02

1. Total Loss = Insertion Loss + 6dB splitter loss.



## electrical schematic



## Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.  
 B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.  
 C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)



# Coaxial Power Splitter/Combiner

## ZSC-2-1+ ZSC-2-1

2 Way-0° 50Ω 0.1 to 400 MHz



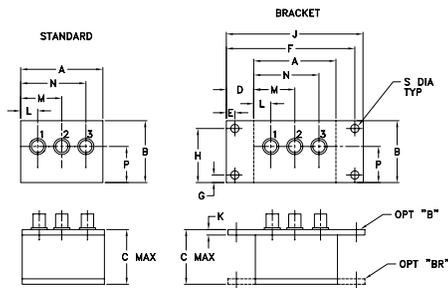
### Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Power Input (as a splitter)	1W max.
Internal Dissipation	0.125W max.

### Coaxial Connections

SUPPORT	2
PORT 1	1
PORT 2	3

### Outline Drawing



### Outline Dimensions (inch/mm)

	A	B	C	D	E	F	G	H
	2.25	1.38	1.24	.50	.150	3.100	.138	1.238
	57.15	35.05	31.50	12.70	3.81	78.74	3.51	31.45

	J	K	L	M	N	P	S	wt
	3.25	.10	.40	1.15	1.86	.64	.150	grams
	82.55	2.54	10.16	29.21	47.24	16.26	3.81	74.0

### Features

- wideband, 0.1 to 400 MHz
- low insertion loss, 0.4 dB typ.
- good isolation, 25 dB typ.
- excellent amplitude unbalance, 0.1 dB typ.
- excellent phase unbalance, 0.2 deg. typ.
- rugged shielded case

### Applications

- VHF/UHF
- communications systems
- instrumentation

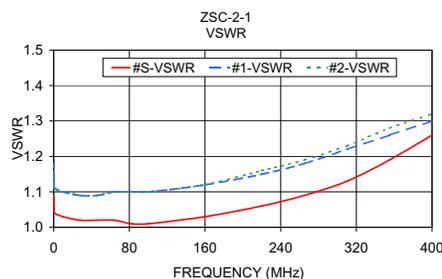
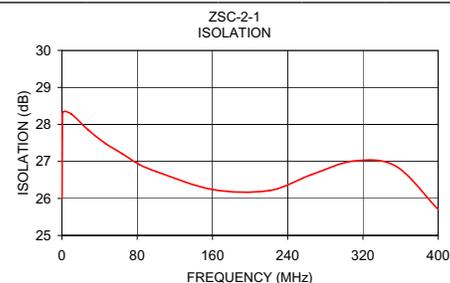
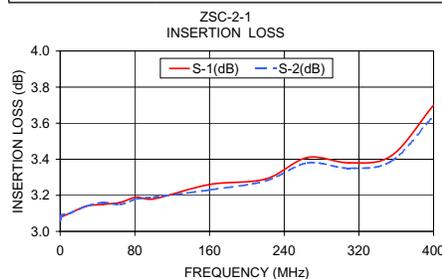
### Splitter Electrical Specifications

FREQ. RANGE (MHz)	ISOLATION (dB)			INSERTION LOSS (dB) ABOVE 3.0 dB			PHASE UNBALANCE (Degrees)			AMPLITUDE UNBALANCE (dB)								
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U						
$f_L$ - $f_U$	Typ.	Min	Typ.	Min	Typ.	Min	Typ.	Max.	Typ.	Max.	Typ.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.		
0.1-400	20	15	25	20	25	20	0.2	0.5	0.4	0.75	0.6	1.0	2	3	4	0.15	0.2	0.3

L = low range [ $f_L$  to  $10 f_L$ ] M = mid range [ $10 f_L$  to  $f_U/2$ ] U = upper range [ $f_U/2$  to  $f_U$ ]

### Typical Performance Data

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)		Amplitude Unbalance (dB)	Isolation (dB)	Phase Unbalance (deg.)	VSWR S	VSWR 1	VSWR 2
	S-1	S-2						
0.10	3.07	3.06	0.00	25.99	0.01	1.09	1.19	1.19
0.40	3.08	3.07	0.01	27.93	0.03	1.05	1.12	1.12
1.00	3.08	3.09	0.01	28.33	0.10	1.04	1.11	1.11
10.00	3.10	3.10	0.01	28.28	0.04	1.03	1.10	1.10
28.00	3.14	3.14	0.00	27.85	0.03	1.02	1.09	1.09
46.00	3.15	3.16	0.01	27.49	0.05	1.02	1.09	1.09
64.00	3.16	3.15	0.01	27.21	0.09	1.02	1.10	1.10
82.00	3.19	3.18	0.01	26.92	0.02	1.01	1.10	1.10
100.00	3.18	3.19	0.01	26.73	0.04	1.01	1.10	1.10
160.00	3.26	3.23	0.02	26.24	0.20	1.03	1.12	1.12
220.00	3.29	3.28	0.02	26.21	0.17	1.06	1.15	1.16
265.00	3.41	3.38	0.03	26.64	0.20	1.09	1.18	1.19
310.00	3.38	3.35	0.03	27.01	0.27	1.13	1.22	1.23
355.00	3.42	3.39	0.03	26.87	0.16	1.19	1.26	1.28
400.00	3.70	3.64	0.06	25.70	0.13	1.26	1.30	1.32



### electrical schematic



**Mini-Circuits®**  
ISO 9001 ISO 14001 CERTIFIED

ALL NEW  
minicircuits.com

P.O. Box 350166, Brooklyn, New York 11235-0003 (718) 934-4500 Fax (718) 332-4661 For detailed performance specs & shopping online see Mini-Circuits web site



The Design Engineers Search Engine Provides ACTUAL Data Instantly From MINI-CIRCUITS At: [www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com)

REV. A  
M104731  
ZSC-2-1  
HY/TD/CP  
070319

RF/IF MICROWAVE COMPONENTS

# Coaxial Bias-Tee

Wideband 2.5 to 6000 MHz

## ZNBT-60-1W+ ZNBT-60-1W



### Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Input Current	500mA
RF Power	30 dBm
Input Current	500mA
Voltage at DC Port	30V

### Coaxial Connections

RF	1 (Type N Male)
RF&DC	2 (Type N Female)
DC	3 (BNC Female)

### Features

- wideband coverage, 2.5 to 6000 MHz
- low insertion loss, 0.6 dB typ.
- high power, 1W & current, 0.5A

### Applications

- biasing amplifiers
- biasing of laser diodes
- biasing of active antennas
- test accessory

CASE STYLE: K558

Connectors	Model	Price	Qty.
N-TYPE FEMALE	ZNBT-60-1W(+)	\$82.95	(1-9)

+ RoHS compliant in accordance with EU Directive (2002/95/EC)

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

### Bias Tee Electrical Specifications

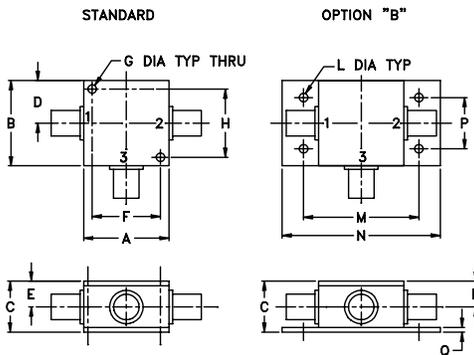
MODEL NO.	FREQ. (MHz)	INSERTION LOSS* (dB)						ISOLATION*(dB) (RF port to DC port) (RF&DC port to DC port)						VSWR** (:1)					
		L		M		U		L		M		U		L		M		U	
		f <sub>l</sub>	f <sub>u</sub>	Typ.	Max.	Typ.	Max.	Typ.	Max.	Typ.	Min.	Typ.	Min.	Typ.	Min.	Typ.	Max.	Typ.	Max.
ZNBT-60-1W(+)	2.5 6000	0.2	0.9	0.6	2.0	1.6	2.2	75	45	45	25	35	20	1.1	1.5	1.1	1.3	1.35	1.6

L= 2.5 - 25 MHz M= 25 - 3000 MHz U= 3000 - 6000 MHz

\* Insertion Loss and Isolation are guaranteed up to 20 dBm-RF power and 200mA DC current.

\*\* VSWR measured with open and short at DC port.

### Outline Drawing

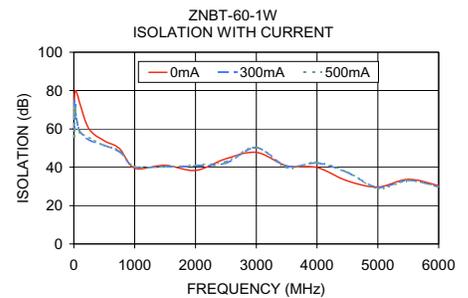
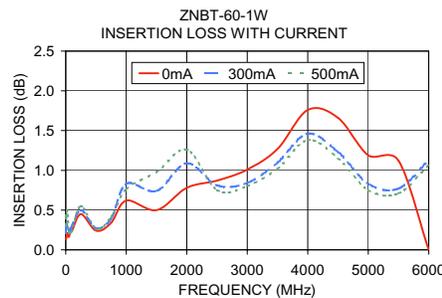


### Outline Dimensions (inch/mm)

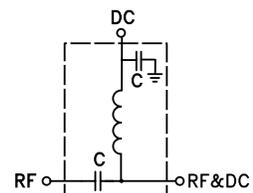
A	B	C	D	E	F	G	H	wt.
1.25	1.25	0.94	0.63	0.47	1.00	1.25	1.00	grams
31.75	31.75	23.88	16.00	11.94	25.40	3.18	24.40	117.0

### Typical Performance Data

Freq. (MHz)	Pin (dBm)	INSERTION LOSS (dB) with current							ISOLATION (dB) (Pin=-10dBm) with current						
		0mA	100mA	200mA	300mA	400mA	500mA	0mA	100mA	200mA	300mA	400mA	500mA		
2.50	30.00	0.13	0.23	0.21	0.22	0.31	0.30	68.50	62.97	60.56	58.97	57.44	55.90		
10.00	29.97	0.15	0.20	0.24	0.32	0.42	0.42	77.66	79.59	76.96	74.04	72.52	71.45		
25.00	29.86	0.21	0.21	0.22	0.29	0.29	0.49	80.02	70.90	70.60	69.99	68.07	66.79		
50.00	30.01	0.16	0.21	0.28	0.25	0.23	0.22	78.47	64.54	64.38	63.82	63.20	62.99		
75.00	30.09	0.23	0.25	0.21	0.24	0.29	0.21	76.00	61.41	61.08	60.63	60.45	60.05		
100.00	30.16	0.23	0.29	0.30	0.29	0.30	0.23	73.21	59.27	58.85	58.49	58.33	57.99		
250.00	29.95	0.45	0.48	0.46	0.50	0.42	0.55	59.95	53.49	53.94	54.27	54.90	55.48		
500.00	29.97	0.24	0.28	0.25	0.27	0.28	0.26	53.84	51.56	51.59	51.49	51.45	51.37		
750.00	30.00	0.34	0.43	0.39	0.39	0.37	0.41	49.76	48.15	48.03	47.97	47.87	48.75		
1000.00	30.12	0.62	0.67	0.77	0.83	0.82	0.76	39.51	40.38	40.33	40.30	40.34	40.39		
1500.00	30.11	0.50	0.53	0.73	0.74	0.82	0.98	40.98	40.70	40.59	40.52	40.38	40.28		
2000.00	30.07	0.78	0.81	1.07	1.09	1.15	1.26	38.39	40.41	40.59	40.79	41.03	41.19		
2500.00	30.33	0.87	0.73	0.76	0.81	0.78	0.75	44.44	43.39	43.34	42.18	43.14	43.02		
3000.00	30.23	1.01	0.81	0.83	0.84	0.81	0.80	47.79	50.29	50.00	50.25	50.35	50.41		
3500.00	29.94	1.27	1.07	1.09	1.10	1.06	1.02	40.78	40.57	40.01	40.48	39.65	39.75		
4000.00	29.62	1.76	1.54	1.51	1.46	1.41	1.38	39.82	41.94	42.51	42.21	42.62	42.60		
4500.00	30.06	1.66	1.29	1.28	1.23	1.18	1.15	32.83	36.48	36.51	37.26	37.33	37.50		
5000.00	30.07	1.19	0.92	0.87	0.83	0.79	0.75	29.66	29.37	29.59	29.56	29.33	28.96		
5500.00	29.53	1.12	0.82	0.79	0.77	0.72	0.71	33.67	33.30	33.28	33.22	33.02	32.93		
6000.00	30.02	1.54	1.17	1.13	1.13	1.10	1.07	30.44	29.81	29.89	29.76	29.58	29.95		



### electrical schematic



# Coaxial Low Pass Filter

## BLP-30+

50Ω DC to 32 MHz

### Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 100°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
RF Power Input	0.5W max.

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.



CASE STYLE: FF55

Connectors	Model
BNC	BLP-30+

**+RoHS Compliant**

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

### Features

- rugged shielded case
- other standard and custom BLP models available with wide selection of fco

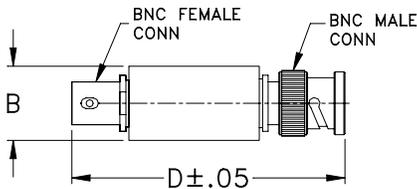
### Applications

- test equipment
- lab use
- video equipment

### Low Pass Filter Electrical Specifications

PASSBAND (MHz)	fco (MHz) Nom.	STOPBAND (MHz)		VSWR (:1)		
		(loss < 1 dB)	(loss > 20 dB)	(loss > 40 dB)	Passband Typ.	Stopband Typ.
DC-32	35		47-61	61-200	1.7	18

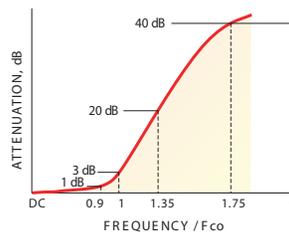
### Outline Drawing



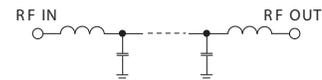
### Outline Dimensions (inch/mm)

B	D	wt
.54	2.59	grams
13.72	65.79	40.0

### typical frequency response

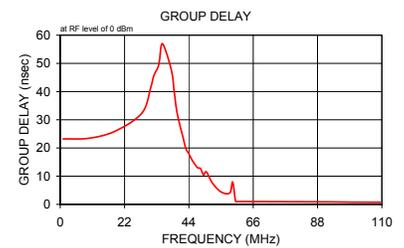
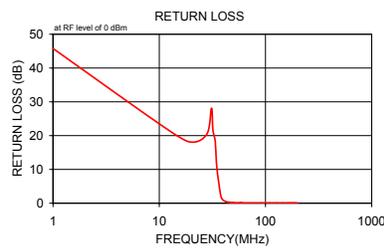


### electrical schematic



### Typical Performance Data

Frequency (MHz)	Insertion Loss (dB)		Return Loss (dB)	Frequency (MHz)	Group Delay (nsec)
	$\bar{x}$	$\sigma$			
1.00	0.07	0.1	45.8	1.00	23.20
10.00	0.21	0.1	23.5	10.00	23.47
19.00	0.29	0.1	18.2	19.00	26.06
28.00	0.37	0.1	20.4	28.00	32.45
31.00	0.48	0.1	28.1	31.00	41.59
32.00	0.55	0.1	21.8	32.00	45.56
33.50	0.62	0.1	18.8	33.50	48.79
34.00	0.76	0.1	16.1	34.00	51.33
35.00	1.30	0.3	9.9	35.00	56.96
38.00	6.09	0.9	2.1	38.00	47.73
40.00	10.76	0.9	0.9	39.00	39.87
43.00	17.56	0.8	0.4	40.00	32.35
45.00	21.65	0.7	0.3	42.00	23.79
46.00	23.56	0.7	0.3	43.00	19.72
47.00	25.39	0.7	0.2	44.00	17.97
48.00	27.19	0.7	0.2	45.00	15.87
50.00	30.58	0.6	0.2	46.00	14.29
55.00	38.32	0.6	0.1	47.00	12.98
59.00	43.69	0.7	0.2	48.00	12.68
60.00	45.01	0.7	0.1	49.00	10.48
61.00	46.27	0.5	0.1	50.00	11.50
91.50	76.88	4.1	0.1	52.00	7.62
109.50	80.77	5.3	0.1	55.00	4.41
127.50	79.89	2.8	0.1	58.00	4.04
145.50	77.20	3.0	0.1	59.00	7.93
164.00	74.52	3.4	0.1	60.00	1.04
173.00	74.92	3.8	0.1	61.00	0.99
182.00	78.05	5.9	0.1	91.50	0.88
191.00	79.62	6.8	0.1	100.50	0.79
200.00	80.65	6.9	0.1	109.50	0.75



#### Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits' applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at [www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp](http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp)





RoHS  
Compliant

## Product Description:

Application	For communication and signal control systems
Multi-construction	1

## Cable Construction:

Conductor	Tinned Copper
1 Singles	
Construction	T0.18 ± 0.008 × 19
Standard Dia.(mm)	0.9
Insulation Layer	Solid PE
Thickness (mm)	1.03
Insulation Dia.(±0.15mm)	2.95
Insulation Colour	Natural
Braiding Layer	Tinned Copper
Construction (Standard)	T0.12 ± 0.008 × 112
Braiding Coverage	94%
Jacket	LSZH
Thickness (mm)	0.65
Dia.(±0.15mm)	4.95
Jacket Colour	Black
Packaging	100m/Cardboard Reel

## Electrical Characteristics:

Max. Conductor DC Resistance at 20°C (Ω/km)	39.2
Min. Insulation DC Resistance at 20°C (MΩ × km)	>500
Operating Temperature Range	-30°C to +80°C
Rated Voltage(V)	1,900V <sub>RMS</sub>
Capacitance (pF/m)	100 ± 5
Velocity Ratio (%)	66
Impedance (Ω)	50 ± 3
Attenuation at 20°C (dB/100m) (±8%)	
100MHz	21
200 MHz	31
1,000MHz	76
Flame Retardancy	IEC 60332-1, UL VW-1

## 9.3. Código de grafo A

```
#!/usr/bin/env python2
# -*- coding: utf-8 -*-
#####
# GNU Radio Python Flow Graph
# Title: Analizador_resolucion_espectral
# Author: César Ceballos
# Generated: Tue Jan 22 15:11:31 2019
#####

if __name__ == '__main__':
import ctypes
import sys
if sys.platform.startswith('linux'):
try:
x11 = ctypes.cdll.LoadLibrary('libX11.so')
x11.XInitThreads()
except:
print "Warning: failed to XInitThreads()"

from PyQt4 import Qt
from PyQt4.QtCore import QObject, pyqtSlot
from gnuradio import blocks
from gnuradio import eng_notation
from gnuradio import gr
from gnuradio import qtgui
from gnuradio import uhd
from gnuradio.eng_option import eng_option
from gnuradio.fft import logpwrfft
from gnuradio.filter import firdes
from gnuradio.qtgui import Range, RangeWidget
from optparse import OptionParser
import sip
import sys
```

```

import time
from gnuradio import qtgui

class BasicRX_Analyzer_resolution(gr.top_block, Qt.QWidget):

    def __init__(self):
gr.top_block.__init__(self, ^analizador_resolucion_espectral")
Qt.QWidget.__init__(self)
self.setWindowTitle(^analizador_resolucion_espectral")
qtgui.util.check_set_qss()
try:
self.setWindowIcon(Qt.QIcon.fromTheme('gnuradio-grc'))
except:
pass
self.top_scroll_layout = Qt.QVBoxLayout()
self.setLayout(self.top_scroll_layout)
self.top_scroll = Qt.QScrollArea()
self.top_scroll.setFrameStyle(Qt.QFrame.NoFrame)
self.top_scroll_layout.addWidget(self.top_scroll)
self.top_scroll.setWidgetResizable(True)
self.top_widget = Qt.QWidget()
self.top_scroll.setWidget(self.top_widget)
self.top_layout = Qt.QVBoxLayout(self.top_widget)
self.top_grid_layout = Qt.QGridLayout()
self.top_layout.addLayout(self.top_grid_layout)

self.settings = Qt.QSettings("GNU Radio", "BasicRX_Analyzer_resolution")
self.restoreGeometry(self.settings.value("geometry").toByteArray())

#####
# Variables
#####
self.samp_rate = samp_rate = 8e6
self.gain = gain = 0

```

```

self.freq = freq = 22e6
self.BW = BW = 8e6

#####
# Blocks
#####
self.tab = Qt.QTabWidget()
self.tab_widget_0 = Qt.QWidget()
self.tab_layout_0 = Qt.QBoxLayout(Qt.QBoxLayout.TopToBottom, self.tab_widget_0)
self.tab_grid_layout_0 = Qt.QGridLayout()
self.tab_layout_0.addLayout(self.tab_grid_layout_0)
self.tab.addTab(self.tab_widget_0, 'FFT')
self.tab_widget_1 = Qt.QWidget()
self.tab_layout_1 = Qt.QBoxLayout(Qt.QBoxLayout.TopToBottom, self.tab_widget_1)
self.tab_grid_layout_1 = Qt.QGridLayout()
self.tab_layout_1.addLayout(self.tab_grid_layout_1)
self.tab.addTab(self.tab_widget_1, 'waterfall')
self.top_layout.addWidget(self.tab)
self._samp_rate_options = [320e3,640e3,1e6,2e6,4e6,8e6]
self._samp_rate_labels = ["320kHz","640kHz","1MHz","2MHz","4MHz","8MHz"]
self._samp_rate_group_box = Qt.QGroupBox('sample_rate')
self._samp_rate_box = Qt.QHBoxLayout()
class variable_chooser_button_group(Qt.QButtonGroup):
def __init__(self, parent=None):
Qt.QButtonGroup.__init__(self, parent)
@pyqtSlot(int)
def updateButtonChecked(self, button_id):
self.button(button_id).setChecked(True)
self._samp_rate_button_group = variable_chooser_button_group()
self._samp_rate_group_box.setLayout(self._samp_rate_box)
for i, label in enumerate(self._samp_rate_labels):
radio_button = Qt.QRadioButton(label)
self._samp_rate_box.addWidget(radio_button)
self._samp_rate_button_group.addButton(radio_button, i)
self._samp_rate_callback = lambda i: Qt.QMetaObject.invokeMethod(self._samp_rate_button_group,

```

```

updateButtonChecked", Qt.Q_ARG(int", self._samp_rate_options.index(i)))
self._samp_rate_callback(self.samp_rate)
self._samp_rate_button_group.buttonClicked[int].connect(
lambda i: self.set_samp_rate(self._samp_rate_options[i]))
self.top_layout.addWidget(self._samp_rate_group_box)
self._gain_range = Range(0, 20, 1, 0, 200)
self._gain_win = RangeWidget(self._gain_range, self.set_gain, 'Gain', counter", float)
self.top_layout.addWidget(self._gain_win)
self._freq_range = Range(0e6, 90e6, 100e3, 22e6, 200)
self._freq_win = RangeWidget(self._freq_range, self.set_freq, "freq", counter_slider", float)
self.top_layout.addWidget(self._freq_win)
self._BW_options = [320e3,640e3,1e6,2e6,4e6,8e6]
self._BW_labels = ["320kHz", "640kHz", "1MHz", "2MHz", "4MHz", "8MHz"]
self._BW_group_box = Qt.QGroupBox('Bandwidth')
self._BW_box = Qt.QHBoxLayout()
class variable_chooser_button_group(Qt.QButtonGroup):
def __init__(self, parent=None):
Qt.QButtonGroup.__init__(self, parent)
@pyqtSlot(int)
def updateButtonChecked(self, button_id):
self.button(button_id).setChecked(True)
self._BW_button_group = variable_chooser_button_group()
self._BW_group_box.setLayout(self._BW_box)
for i, label in enumerate(self._BW_labels):
radio_button = Qt.QRadioButton(label)
self._BW_box.addWidget(radio_button)
self._BW_button_group.addButton(radio_button, i)
self._BW_callback = lambda i: Qt.QMetaObject.invokeMethod(self._BW_button_group, updateButtonChecked", Qt.Q_ARG(int", self._BW_options.index(i)))
self._BW_callback(self.BW)
self._BW_button_group.buttonClicked[int].connect(
lambda i: self.set_BW(self._BW_options[i]))
self.top_layout.addWidget(self._BW_group_box)
self.waterfall = qtgui.waterfall_sink_c( 4096,#size
firdes.WIN_BLACKMAN_hARRIS, #wintype

```

```

freq, #fc
BW, #bw
.Espectro en tiempo", #name
1 #number of inputs
)
self.waterfall.set_update_time(0.10)
self.waterfall.enable_grid(True)
self.waterfall.enable_axis_labels(True)

    if not True:
self.waterfall.disable_legend()

    if complex-="float." or complex-="msg_float":
self.waterfall.set_plot_pos_half(not True)

    labels = ['waterfall', ", ", ", ", ", ",
", ", ", ", ", "]
colors = [0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0]
alphas = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]
for i in xrange(1):
if len(labels[i]) == 0:
self.waterfall.set_line_label(i, "Data 0".format(i))
else:
self.waterfall.set_line_label(i, labels[i])
self.waterfall.set_color_map(i, colors[i])
self.waterfall.set_line_alpha(i, alphas[i])

self.waterfall.set_intensity_range(-150, 0)

self._waterfall_win = sip.wrapinstance(self.waterfall.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.tab_layout_1.addWidget(self._waterfall_win)
self.usrp_source = uhd.usrp_source(

```

```

", ".join((, )),
uhd.stream_args(
cpu_format="fc32",
channels=range(1),
),
)
self.usrp_source.set_subdev_spec('A:B', 0)
self.usrp_source.set_samp_rate(samp_rate)
self.usrp_source.set_center_freq(freq, 0)
self.usrp_source.set_gain(gain, 0)
self.usrp_source.set_antenna('RXB', 0)
self.logpwrfft_x_0 = logpwrfft.logpwrfft_c(
sample_rate=samp_rate,
fft_size=1024,
ref_scale=2,
frame_rate=2,
avg_alpha=1.0,
average=False,
)
self.blocks_file_sink_1 = blocks.file_sink(gr.sizeof_float*1024, '/Users/cesar/Documents/stan/GNURadio/
False)
self.blocks_file_sink_1.set_unbuffered(False)
self.blocks_file_sink_0 = blocks.file_sink(gr.sizeof_gr_complex*1, '/Users/cesar/Documents/stan/GNURa
False)
self.blocks_file_sink_0.set_unbuffered(False)
self.FFT = qtgui.freq_sink_c(
1024, #size
firdes.WIN_BLACKMAN_hARRIS, #wintype
freq, #fc
BW, #bw
".Espectro de frecuencia", #name
1 #number of inputs
)
self.FFT.set_update_time(0.10)
self.FFT.set_y_axis(-140, 10)

```

```

self.FFT.set_y_label('Power', 'dB')
self.FFT.set_trigger_mode(QtGui.TRIG_MODE_FREE, 0.0, 0, )
self.FFT.enable_autoscale(False)
self.FFT.enable_grid(True)
self.FFT.set_fft_average(1.0)
self.FFT.enable_axis_labels(True)
self.FFT.enable_control_panel(True)

    if not True:
self.FFT.disable_legend()

    if complex== "float." or complex== "msg_float":
self.FFT.set_plot_pos_half(not True)

    labels = ['FFT', ',', ',', ',', ',',
', , , , ,']
widths = [1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1]
colors = ["blue", red, "green", "black", cyan,
"magenta", yellow, "dark red", "dark green", "dark blue"]
alphas = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]
for i in xrange(1):
if len(labels[i]) == 0:
self.FFT.set_line_label(i, "Data 0".format(i))
else:
self.FFT.set_line_label(i, labels[i])
self.FFT.set_line_width(i, widths[i])
self.FFT.set_line_color(i, colors[i])
self.FFT.set_line_alpha(i, alphas[i])

    self._FFT_win = sip.wrapinstance(self.FFT.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.tab_layout_0.addWidget(self._FFT_win)

```

```

#####
# Connections
#####
self.connect((self.logpwrfft_x_0, 0), (self.blocks_file_sink_1, 0))
self.connect((self.usrp_source, 0), (self.FFT, 0))
self.connect((self.usrp_source, 0), (self.blocks_file_sink_0, 0))
self.connect((self.usrp_source, 0), (self.logpwrfft_x_0, 0))
self.connect((self.usrp_source, 0), (self.waterfall, 0))

    def closeEvent(self, event):
self.settings = Qt.QSettings("GNU Radio", "BasicRX_Analyzer_resolution")
self.settings.setValue("geometry", self.saveGeometry())
event.accept()

    def get_samp_rate(self):
return self.samp_rate

    def set_samp_rate(self, samp_rate):
self.samp_rate = samp_rate
self._samp_rate_callback(self.samp_rate)
self.usrp_source.set_samp_rate(self.samp_rate)
self.logpwrfft_x_0.set_sample_rate(self.samp_rate)

    def get_gain(self):
return self.gain

    def set_gain(self, gain):
self.gain = gain
self.usrp_source.set_gain(self.gain, 0)

    def get_freq(self):
return self.freq

```

```
    def set_freq(self, freq):
self.freq = freq
self.waterfall.set_frequency_range(self.freq, self.BW)
self.usrp_source.set_center_freq(self.freq, 0)
self.FFT.set_frequency_range(self.freq, self.BW)

    def get_BW(self):
return self.BW

    def set_BW(self, BW):
self.BW = BW
self._BW_callback(self.BW)
self.waterfall.set_frequency_range(self.freq, self.BW)
self.FFT.set_frequency_range(self.freq, self.BW)

def main(top_block_cls=BasicRX_Analyzer_resolution, options=None):

    from distutils.version import StrictVersion
if StrictVersion(Qt.qVersion()) >= StrictVersion("4.5.0"):
style = gr.prefs().get_string('qtgui', 'style', 'raster')
Qt.QApplication.setGraphicsSystem(style)
qapp = Qt.QApplication(sys.argv)

    tb = top_block_cls()
tb.start()
tb.show()

    def quitting():
tb.stop()
tb.wait()
qapp.connect(qapp, Qt.SIGNAL('aboutToQuit()'), quitting)
qapp.exec_()
```

```

    if __name__ == '__main__':
main()

```

## 9.4. Código de grafo B

```

#!/usr/bin/env python2
# -*- coding: utf-8 -*-
#####
# GNU Radio Python Flow Graph
# Title: visualizador
# Author: César
# Generated: Mon Dec 10 01:17:48 2018
#####

if __name__ == '__main__':
import ctypes
import sys
if sys.platform.startswith('linux'):
try:
x11 = ctypes.cdll.LoadLibrary('libX11.so')
x11.XInitThreads()
except:
print 'Warning: failed to XInitThreads()'

from PyQt4 import Qt
from PyQt4.QtCore import QObject, pyqtSlot
from gnuradio import blocks
from gnuradio import eng_notation
from gnuradio import gr
from gnuradio import qtgui
from gnuradio.eng_option import eng_option
from gnuradio.filter import firdec
from gnuradio.qtgui import Range, RangeWidget
from optparse import OptionParser

```

```

import sip
import sys
from gnuradio import qtgui

class visualizador(gr.top_block, Qt.QWidget):

    def __init__(self):
gr.top_block.__init__(self, "visualizador")
Qt.QWidget.__init__(self)
self.setWindowTitle("visualizador")
qtgui.util.check_set_qss()
try:
self.setWindowIcon(Qt.QIcon.fromTheme('gnuradio-grc'))
except:
pass
self.top_scroll_layout = Qt.QVBoxLayout()
self.setLayout(self.top_scroll_layout)
self.top_scroll = Qt.QScrollArea()
self.top_scroll.setFrameStyle(Qt.QFrame.NoFrame)
self.top_scroll_layout.addWidget(self.top_scroll)
self.top_scroll.setWidgetResizable(True)
self.top_widget = Qt.QWidget()
self.top_scroll.setWidget(self.top_widget)
self.top_layout = Qt.QVBoxLayout(self.top_widget)
self.top_grid_layout = Qt.QGridLayout()
self.top_layout.addLayout(self.top_grid_layout)

self.settings = Qt.QSettings("GNU Radio", "visualizador")
self.restoreGeometry(self.settings.value("geometry").toByteArray())

#####
# Variables
#####
self.samp_rate = samp_rate = 640e3

```

```

self.gain = gain = 0
self.freq = freq = 14e6
self.BW = BW = 640e3

#####
# Blocks
#####
self.tab = Qt.QTabWidget()
self.tab_widget_0 = Qt.QWidget()
self.tab_layout_0 = Qt.QBoxLayout(Qt.QBoxLayout.TopToBottom, self.tab_widget_0)
self.tab_grid_layout_0 = Qt.QGridLayout()
self.tab_layout_0.addLayout(self.tab_grid_layout_0)
self.tab.addTab(self.tab_widget_0, 'FFT')
self.tab_widget_1 = Qt.QWidget()
self.tab_layout_1 = Qt.QBoxLayout(Qt.QBoxLayout.TopToBottom, self.tab_widget_1)
self.tab_grid_layout_1 = Qt.QGridLayout()
self.tab_layout_1.addLayout(self.tab_grid_layout_1)
self.tab.addTab(self.tab_widget_1, 'waterfall')
self.top_layout.addWidget(self.tab)
self._samp_rate_options = [320e3,640e3,1e6,2e6,4e6,8e6]
self._samp_rate_labels = ["320kHz","640kHz","1MHz","2MHz","4MHz","8MHz"]
self._samp_rate_group_box = Qt.QGroupBox('sample_rate')
self._samp_rate_box = Qt.QHBoxLayout()
class variable_chooser_button_group(Qt.QButtonGroup):
def __init__(self, parent=None):
Qt.QButtonGroup.__init__(self, parent)
@pyqtSlot(int)
def updateButtonChecked(self, button_id):
self.button(button_id).setChecked(True)
self._samp_rate_button_group = variable_chooser_button_group()
self._samp_rate_group_box.setLayout(self._samp_rate_box)
for i, label in enumerate(self._samp_rate_labels): radio_button = Qt.QRadioButton(label)
self._samp_rate_box.addWidget(radio_button)
self._samp_rate_button_group.addButton(radio_button, i)
self._samp_rate_callback = lambda i: Qt.QMetaObject.invokeMethod(self._samp_rate_button_group,

```

```

updateButtonChecked", Qt.Q_ARG(int", self._samp_rate_options.index(i)))
self._samp_rate_callback(self.samp_rate)
self._samp_rate_button_group.buttonClicked[int].connect( lambda i: self.set_samp_rate(self._samp_rate
self.top_layout.addWidget(self._samp_rate_group_box)
self._freq_range = Range(10e6, 90e6, 100e3, 14e6, 200)
self._freq_win = RangeWidget(self._freq_range, self.set_freq, "freq", counter_slider", float)
self.top_layout.addWidget(self._freq_win)
self._BW_options = [320e3,640e3,1e6,2e6,4e6,8e6]
self._BW_labels = ["320kHz","640kHz","1MHz","2MHz","4MHz","8MHz"]
self._BW_group_box = Qt.QGroupBox('Bandwidth')
self._BW_box = Qt.QHBoxLayout()
class variable_chooser_button_group(Qt.QButtonGroup):
def __init__(self, parent=None):
Qt.QButtonGroup.__init__(self, parent)
pyqtSlot(int)
def updateButtonChecked(self, button_id):
self.button(button_id).setChecked(True)
self._BW_button_group = variable_chooser_button_group()
self._BW_group_box.setLayout(self._BW_box)
for i, label in enumerate(self._BW_labels):
radio_button = Qt.QRadioButton(label)
self._BW_box.addWidget(radio_button)
self._BW_button_group.addButton(radio_button, i)
self._BW_callback = lambda i: Qt.QMetaObject.invokeMethod(self._BW_button_group, üp-
dateButtonChecked", Qt.Q_ARG(int", self._BW_options.index(i)))
self._BW_callback(self.BW)
self._BW_button_group.buttonClicked[int].connect( lambda i: self.set_BW(self._BW_options[i]))
self.top_layout.addWidget(self._BW_group_box)
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0 = qtgui.waterfall_sink_c( 1024, #size
firdes.WIN_BLACKMAN_hARRIS, #wintype
freq, #fc
BW, #bw
'Espectro en tiempo', #name
1 #number of inputs
)

```

```

self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_update_time(0.10)
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.enable_grid(False)
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.enable_axis_labels(True)

    if not True:
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.disable_legend()

    if complex"==" "float."r complex"==" "msg_float":
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_plot_pos_half(not True)

        labels = [",", ",", ",", ",", ",",
",", ",", ",", ",", "]
colors = [0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0]
alphas = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]
for i in xrange(1):
if len(labels[i]) == 0:
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_line_label(i, "Data {0}".format(i))
else:
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_line_label(i, labels[i])
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_color_map(i, colors[i])
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_line_alpha(i, alphas[i])

self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_intensity_range(-140, 10)

self._qtgui_waterfall_sink_x_0_0_win =
sip.wrapinstance(self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.tab_layout_1.addWidget(self._qtgui_waterfall_sink_x_0_0_win)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0 = qtgui.freq_sink_c( 1024, #size
firdes.WIN_BLACKMAN_hARRIS, #wintype
freq, #fc
BW, #bw
'Espectro de frecuencia', #name

```

```

1 #number of inputs
)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_update_time(0.10)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_y_axis(-140, 10)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_y_label('Relative Gain', 'dB')
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_trigger_mode(qtgui.TRIG_MODE_FREE, 0.0, 0, )
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.enable_autoscale(False)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.enable_grid(False)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_fft_average(1.0)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.enable_axis_labels(True)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.enable_control_panel(True)

    if not True:
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.disable_legend()

    if "complex"=="float.or complex"=="msg_float":
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_plot_pos_half(not True)

    labels = [",", ",", ",", ",", ",",
",", ",", ",", ",", "]
widths = [1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1]
colors = ["blue", red", "green", "black", cyan",
"magenta", zellow", "dark red", "dark green", "dark blue"]
alphas = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]
for i in xrange(1):
if len(labels[i]) == 0:
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_line_label(i, "Data {0}".format(i))
else:
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_line_label(i, labels[i])
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_line_width(i, widths[i])
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_line_color(i, colors[i])
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_line_alpha(i, alphas[i])

```

```

self._qtgui_freq_sink_x_0_0_win =
sip.wrapinstance(self.qtgui_freq_sink_x_0_0.pyqwidget(), Qt.QWidget)
self.tab_layout_0.addWidget(self._qtgui_freq_sink_x_0_0_win)
self._gain_range = Range(0, 20, 1, 0, 200)
self._gain_win = RangeWidget(self._gain_range, self.set_gain, 'Gain', 'counter', float)
self.top_layout.addWidget(self._gain_win)
self.blocks_throttle_0_0 = blocks.throttle(gr.sizeof_gr_complex*1, samp_rate, True)
self.blocks_file_source_1 = blocks.file_source(gr.sizeof_gr_complex*1, '/Users/cesar/Documents/stan/GN
False)

#####
# Connections
#####
self.connect((self.blocks_file_source_1, 0), (self.blocks_throttle_0_0, 0))
self.connect((self.blocks_throttle_0_0, 0), (self.qtgui_freq_sink_x_0_0, 0))
self.connect((self.blocks_throttle_0_0, 0), (self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0, 0))

def closeEvent(self, event):
self.settings = Qt.QSettings("GNU Radio", "visualizador")
self.settings.setValue("geometry", self.saveGeometry())
event.accept()

def get_samp_rate(self):
return self.samp_rate

def set_samp_rate(self, samp_rate):
self.samp_rate = samp_rate
self._samp_rate_callback(self.samp_rate)
self.blocks_throttle_0_0.set_sample_rate(self.samp_rate)

def get_gain(self):
return self.gain

```

```
    def set_gain(self, gain):
self.gain = gain

    def get_freq(self):
return self.freq

    def set_freq(self, freq):
self.freq = freq
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_frequency_range(self.freq, self.BW)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_frequency_range(self.freq, self.BW)

    def get_BW(self):
return self.BW

    def set_BW(self, BW):
self.BW = BW
self._BW_callback(self.BW)
self.qtgui_waterfall_sink_x_0_0.set_frequency_range(self.freq, self.BW)
self.qtgui_freq_sink_x_0_0.set_frequency_range(self.freq, self.BW)

def main(top_block_cls=visualizador, options=None):

    from distutils.version import StrictVersion
    if StrictVersion(Qt.qVersion()) >= StrictVersion("4.5.0"):
        style = gr.prefs().get_string('qtgui', 'style', 'raster')
        Qt.QApplication.setGraphicsSystem(style)
        qapp = Qt.QApplication(sys.argv)

        tb = top_block_cls()
        tb.start()
        tb.show()
```

```

    def quitting():
tb.stop()
tb.wait()
qapp.connect(qapp, Qt.SIGNAL("aboutToQuit()"), quitting)
qapp.exec_()

if __name__ == '__main__':
main()

```

## 9.5. Código de barrido de frecuencias

```

from BasicRX_analyzer import *
from PyQt4.QtCore import QThread, QTimer
import argparse

brx = None
freq = None
interval = None

def change_freq():
global brx, freq, interval
new_freq = brx.get_freq() + freq
if (new_freq > 86e6):
new_freq = 14e6
brx.set_freq(new_freq)

def main(top_block_cls=BasicRX_analyzer, options=None):
global brx, freq, tdelta

parser = argparse.ArgumentParser(description='Barrido de frecuencias')
parser.add_argument('-t', '-time', type=int, help='Tiempo en cada frecuencia
(milisegundos)', default=10000)

```

```
parser.add_argument('-f', '-freq', type=int, help='Delta de frecuencia',
                    default=8e6)
args = parser.parse_args()
tdelta = args.time
freq = args.freq
```

```
from distutils.version import StrictVersion
if StrictVersion(Qt.qVersion()) >= StrictVersion("4.5.0"):
    style = gr.prefs().get_string('qtgui', 'style', 'raster')
    Qt.QApplication.setGraphicsSystem(style)
    qapp = Qt.QApplication(sys.argv)
```

```
tb = top_block_cls()
tb.start()
tb.show()
brx=tb
timer = QTimer()
timer.timeout.connect(change_freq)
timer.start(tdelta)
```

```
def quitting():
    tb.stop()
    tb.wait()
```

```
qapp.connect(qapp, Qt.SIGNAL('aboutToQuit()'), quitting)
qapp.exec_()
```

```
if __name__ == '__main__':
    main()
```

## 9.6. Muestreo pasa bandas y conversión de bajada

Haciendo uso de la ecuación 3.18, se puede obtener el rango de valores validos para la frecuencia de muestreo, cuando se hace muestreo pasa bandas. Para nuestro caso, donde estamos observando bandas de 8 MHz, y queremos cubrir el espectro hasta los 90 MHz (el límite superior del rango de operación de las antenas dipolo), se obtienen los valores mostrados en las tablas 9.1 - 9.6.

$f_c = 46MHz$		
m	$\frac{2f_c-B}{m}$	$\frac{2f_c+B}{m+1}$
1	84 MHz	50 MHz
2	42 MHz	33.3 MHz
3	28 MHz	25 MHz
4	21 MHz	20 MHz
5	16.8 MHz	16.6 MHz

Tabla 9.1: Frecuencias para *muestreo pasa bandas* para una ventana de 8 MHz a una frecuencia central de 46 MHz.

$f_c = 54MHz$		
m	$\frac{2f_c-B}{m}$	$\frac{2f_c+B}{m+1}$
1	100 MHz	58 MHz
2	50 MHz	38.6 MHz
3	33.3 MHz	29 MHz
4	25 MHz	23.2 MHz
5	20 MHz	19.3 MHz
6	16.6 MHz	16.5 MHz

Tabla 9.2: Frecuencias de muestreo para *muestreo pasa bandas* para una ventana de 8 MHz a una frecuencia central de 54 MHz.

$f_c = 62MHz$		
m	$\frac{2f_c-B}{m}$	$\frac{2f_c+B}{m+1}$
1	116 MHz	66 MHz
2	58 MHz	44 MHz
3	38.6 MHz	33 MHz
4	29 MHz	26.5 MHz
5	23.2 MHz	22 MHz
6	19.3 MHz	18.8 MHz
7	16.5 MHz	16.5 MHz

Tabla 9.3: Frecuencias de muestreo para *muestreo pasa bandas* para una ventana de 8 MHz a una frecuencia central de 62 MHz.

$f_c = 70MHz$		
m	$\frac{2f_c-B}{m}$	$\frac{2f_c+B}{m+1}$
1	132 MHz	74 MHz
2	66 MHz	49.3 MHz
3	44 MHz	37 MHz
4	33 MHz	29.6 MHz
5	26.4 MHz	24.6 MHz
6	22 MHz	21.1 MHz
7	18.8 MHz	18.5 MHz
8	16.5 MHz	16.4 MHz

Tabla 9.4: Frecuencias de muestreo para *muestreo pasa bandas* para una ventana de 8 MHz a una frecuencia central de 70 MHz.

$f_c = 78MHz$		
m	$\frac{2f_c-B}{m}$	$\frac{2f_c+B}{m+1}$
1	148 MHz	82 MHz
2	74 MHz	54.6 MHz
3	49.3 MHz	41 MHz
4	37 MHz	32.8 MHz
5	29.6 MHz	27.3 MHz
6	24.6 MHz	23.4 MHz
7	21.1 MHz	20.5 MHz
8	18.5 MHz	18.2 MHz
9	16.4 MHz	16.4 MHz

Tabla 9.5: Frecuencias de muestreo para *muestreo pasa bandas* para una ventana de 8 MHz a una frecuencia central de 78 MHz.

$f_c = 86MHz$		
m	$\frac{2f_c-B}{m}$	$\frac{2f_c+B}{m+1}$
1	164 MHz	90 MHz
2	82 MHz	60 MHz
3	54.6 MHz	45 MHz
4	41 MHz	36 MHz
5	32.8 MHz	30 MHz
6	27.3 MHz	25.7 MHz
7	23.4 MHz	22.5 MHz
8	20.05 MHz	20 MHz
9	18.2 MHz	18 MHz
10	16.4 MHz	16.3 MHz

Tabla 9.6: Frecuencias de muestreo para *muestreo pasa bandas* para una ventana de 8 MHz a una frecuencia central de 86 MHz.

Por otro lado, esta técnica implica el cambio en la frecuencia de muestreo, pero como se

describe en la sección 4.3.2, la tasa de muestreo del USRP-1 esta fija, y no se puede modificar; sin embargo, la aplicación de nuestra metodología basada en la SDR debe funcionar para cualquier USRP, y como se menciona en la misma sección 4.3.2, existen más versiones de USRP, estas versiones sí permiten modificar la frecuencia de muestreo y se puede aplicar la técnica con las frecuencias calculadas para cubrir un rango espectral mayor.

La conversión de bajada se hace básicamente mezclando la señal de radio de interés (de alta frecuencia) con una señal generada de manera artificial, obteniendo en banda base la señal original.

Sea  $f_c$  la frecuencia de la señal de interés,  $f_o$  la señal generada y  $f_m$  la señal mezclada resultante, se tiene que

$$f_m = f_o \pm f_c \quad (9.9)$$

Es decir, se tienen 2 señales a 2 frecuencias distintas:  $f_o + f_c$  y  $f_o - f_c$ . Supongamos que  $f_o = 100$  MHz y  $f_c = 80$  MHz, se tendrá entonces una señal a 180 MHz y otra señal a 20 MHz.

En la práctica, esta conversión de bajada se hace con 2 elementos hardware, un oscilador, que genera la señal; y un mezclador, que combina la señal del oscilador con la señal de radio. Ya que el espectro se estará viendo en banda base, la señal que se obtendrá es la de menor frecuencia (20 MHz en este ejemplo); de ahí el nombre de conversión de bajada. Generalmente se pone un filtro pasa bajas después del mezclador, como se hizo en este trabajo.

Esta técnica de conversión de bajada, se puede aplicar a nuestro sistema con el USRP-1, aunque implica añadir el par de elementos más al sistema.

# Bibliografía

- [1] aaronia.com <<https://www.aaronia.com/products/antennas/HyperLog-30350-Super-Wideband-Antenna/>>
- [2] Acuerdo mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones actualiza el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. Diario oficial de la federación (2018, 01 de octubre), Ciudad de México. Versión electrónica: <[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5539626&fecha=01/10/2018](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5539626&fecha=01/10/2018)>
- [3] An, T., Chen, X., Mohan, P., & Lao, B. Q. 2017, *Acta Astronomica Sinica*, 58, 43
- [4] Balanis, C. (2005). *Antenna theory*. 3rd ed. New York: Wiley
- [5] Baan, W. A., Fridman, P. A., & Millenaar, R. P. 2004, *AJ*, 128, 933
- [6] Bentum, Mark & Boonstra, Albert-Jan & Millenaar, Rob. (2010). Assessments of RFI measurements for LOFAR. 006. 10.22323/1.107.0006
- [7] Boonstra A. J., *Radio Frequency Interference Mitigation in Radio Astronomy*, PhD thesis Delft University of Technology, ISBN 90-805434-3-8, 2005.
- [8] Bower, G.C. 2005, *Radio Science*, 40, RS5S07
- [9] CRAF handbook for radio astronomy. (2005). 3rd ed. Dwingeloo, The Netherlands: CRAF Secretariat, Netherlands Foundation for Research Astronomy.
- [10] Dean Straw R. (2007). *Antenna Book*. 2st ed. USA: ARRL
- [11] Ekers, R., & Bell, J. 2000, arXiv:astro-ph/0002515
- [12] Ekers, R. D., & Bell, J. F. (2000). The future of radio astronomy: Options for dealing with human generated interference. *Preserving the Astronomical Sky IAU Symposium 196*.

- 
- [13] Ettus research. USRP1 Bus Series Data Sheet. <[https://www.ettus.com/content/files/07495\\_Ettus\\_USRP1\\_Bus\\_Series\\_Data\\_Sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/07495_Ettus_USRP1_Bus_Series_Data_Sheet.pdf)>
- [14] Ettus research. USRP1. <<https://kb.ettus.com/USRP1>>
- [15] Ettus research. BasicTX/BasicRx <<https://kb.ettus.com/BasicTX/BasicRX>>
- [16] Ettus research. Selecting an RF Daughterboard. <[https://kb.ettus.com/Selecting\\_an\\_RF\\_Daughterboard](https://kb.ettus.com/Selecting_an_RF_Daughterboard)>
- [17] Ettus research. BasicRx Daughterboard 1-250 MHz Rx. <<https://www.ettus.com/product/details/BasicRX>>
- [18] Fisher Miller Diane, Basics of Radio Astronomy, 1998
- [19] Fridman, P. A. 2008, AJ, 135, 1810
- [20] Fridman, P. A., & Baan, W. A. 2001, A&A, 378, 327
- [21] Goran Porko Jukka Pekka, Radio frequency interference in radioastronomy, tesis de maestría, AALTO University school of electrical engineering, 2011
- [22] Hamidi, Zety & Shariff, N N M. (2014). Investigation of Radio Frequency Interference (RFI) Profile and Determination of Potential Astronomical Radio Sources. International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy.
- [23] Handbook of frequency allocation and spectrum protection for scientific uses, segunda edición, 2007
- [24] Hicks B. C. et al., 2012, PASP, 124, 1090
- [25] Hogden, J., Vander Wiel, S., Bower, G. C., et al. 2012, apj, 747, 141
- [26] Huege, T. 2014, Brazilian Journal of Physics, 44, 520
- [27] Instituto Federal de Telecomunicaciones. Cuadro Nacional de Atribucion de Frecuencias. <<http://cnaf.ift.org.mx>>
- [28] International Telecommunications Union. Rec. UIT-R RA.769-2. <<https://www.itu.int/rec/R-REC-RA.769-2-200305-I/en>>
- [29] International Telecommunications Union. Radio astronomy. <<https://www.itu.int/rec/R-REC-RA/en>>

- 
- [30] International Telecommunications Union. Rec. UIT-R RA.314-10. <<https://www.itu.int/rec/R-REC-RA-314-10-200306-1/en>>
- [31] International Telecommunication Union, Radio Regulations, edición 2016, Geneva, Switzerland, 2016
- [32] Jacques Camarena Heriberto, Arreglos planares de dipolos y su aplicación en el radiotelescopio MEXART, tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, 2006
- [33] Jayaweera K. Sudharman, 2014, Signal procesing for cognitive radios, 1st ed, Wiley. New Jersey
- [34] J. M. Ford and K. D. Buch, RFI mitigation techniques in radio astronomy,"2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC, 2014, pp. 231-234.
- [35] Lyons Richard G. (2011). Undertanding Digital Signal processing. 3rd ed. EUA: Prentice Hall.
- [36] M. Kesteven, Radio-frequency interference mitigation in radio astronomy, in URSI Radio Science Bulletin, vol. 2007, no. 322, pp. 9-18, Sept. 2007.
- [37] Marques, M. S., Zarka, P., Echer, E., et al. 2017, A&A, 604, A17
- [38] Martínez Escalante Gustavo Alonso , Receptores de microondas y ondas milimétricas con aplicación en monitoreo de radiofrecuencias y radiometría, tesis de doctorado, INAOE, 2013
- [39] Melis, A., Gaudiomonte, F., Barbaro, M., et al. 2014, Proc. SPIE, 9153, 915338
- [40] Millenar, R.P. and Stiepel H. J., On self-generated RFI at Radio Astronomy Sites, Committee on Radio Astronomy frequencies, CRAF-04-1, 2003.
- [41] myriadrf <<https://myriadrf.org/projects/component/limesdr/>>
- [42] Montero Hidalgo Juan Pablo, Implementación de un sistema de comunicación basado en software radio, proyecto fin de carrera, Universidad autónoma de Madrid, 2014
- [43] Offringa, A.R., Wayth, R.B., Hurley-Walker, N., et al. 2015, pasa, 32, e008
- [44] Oran Brigham E. (1988). The Fast Fourier Transform and its applications. New Jersey. Prentice Hall.

- [45] Pinar Domínguez Ivan, Murillo Fuentes Juan Jose, 2011, Laboratorio de comunicaciones digitales radio definida por software, Sevilla.
- [46] Proakis John G & Manolakis Dimitris G. (2007). Tratamiento digital de señales. 4 th ed. Madrid. Prentice Hall.
- [47] Pylaev, O. S., Zaqarashvili, T. V., Brazhenko, A. I., et al. 2017, A&A, 601, A42
- [48] Rohde & Schwarz GmbH & Co.KG <[https://www.rohde-schwarz.com/lat/producto/fs300\\_fs315-pagina-de-inicio-producto\\_63493-9010.html](https://www.rohde-schwarz.com/lat/producto/fs300_fs315-pagina-de-inicio-producto_63493-9010.html)>
- [49] Rodger H. Hosking. Digital Receiver Handbook: Basics of Software Radio. Pentek, quinta edición, 2006.
- [50] Rodger H. Hosking. Software Defined Radio Handbook. Pentek, 11 edición, 2013.
- [51] Ruf, C., Detection and mitigation of radio frequency interference using a digital kurtosis spectrometer/detector
- [52] Sánchez Lakehal Alejandro, La radio definida por software: recepción de las comunicaciones tierra-aire dentro de la banda aeronautica, trabajo final de carrera, Universidad politecnica de Cataluña, 2015
- [53] Schollar Christopher, RFI monitoring for the Meerkat telescope, tesis de maestría, Univer-sidade Cape Town, 2015
- [54] Stovall, K., Ray, P. S., Blythe, J., et al. 2015, ApJ, 808, 156
- [55] Stutzman, W. and Thiele, G. (2013). Antenna theory and design. 3rd ed. NY. Wiley
- [56] Thompson A.R. 1982, The Response of a Radio-Astronomy Synthesis Array to Interfering Signals, IEEE Trans. on Ant. and Propag., Vol. AP-30, pp450-456.
- [57] Yed Bahari Ramadhan Bin Syed Adnan, The study of radio frequency interference (RFI) for radio astronomy in some remote locations in peninsular Malaysia, tesis de maestría, University of Malaya, 2010
- [58] Wilson, T., Rohlfs, K. and Huettemeister, S. (2013). Tools of Radio Astronomy. 6th ed. Berlin: Springer.
- [59] Witte, Robert A., (2014). Spectrum and Network Measurements. 2nd ed. Edison, NJ: Scitech Publising.