CONSTRUCCIÓN DE UN RADIOTELESCOPIO DE 83 CENTÍMETROS DE DIÁMETRO EN LA BANDA DE 12 GIGAHERTZ EN EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO



NORIDA JAZMÍN ORDÓÑEZ TORO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES DEPARTAMENTO DE FÍSICA 2018

CONSTRUCCIÓN DE UN RADIOTELESCOPIO DE 83 CENTÍMETROS DE DIÁMETRO EN LA BANDA DE 12 GIGAHERTZ EN EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

NORIDA JAZMÍN ORDÓÑEZ TORO

TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE FÍSICO

DIRECTOR ALBERTO QUIJANO VODNIZA MÁSTER EN FÍSICA - UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

DIRECTOR EXTERNO **ABRAHAM LUNA CASTELLANOS** DOCTOR EN ASTROFÍSICA - INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES DEPARTAMENTO DE FÍSICA 2018 "Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor"

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño. Nota de Aceptación

Director: MSc. Alberto Quijano Vodniza

Jurado: MSc. James Perengüez López

Jurado: Ph.D. Luis Aphranio Portilla Salazar

San Juan de Pasto, 23 de Marzo de 2018

Dedicado a mi familia, especialmente a mis padres por su infinito apoyo, esfuerzo y confianza, por enseñarme siempre a luchar por mis sueños. "... El cosmos es todo lo que es, todo lo que fue y todo lo que será. Nuestras más ligeras contemplaciones del cosmos nos hacen estremecer: Sentimos como un cosquilleo nos llena los nervios, una voz muda, una ligera sensación como de un recuerdo lejano o como si cayéramos desde gran altura. Sabemos que nos aproximamos al más grande de los misterios..."

Carl Sagan (1934-1996)

Agradecimientos

Resulta difícil expresar en pocas líneas el profundo agradecimiento que siento por tantas personas que han hecho posible culminar esta etapa en mi vida, ha sido un largo camino, con algunos tropiezos, que sin duda hicieron aún más interesante el transcurso de este recorrido.

Desde siempre he tenido la fortuna de contar con el apoyo incondicional de mi familia y aunque en un principio mi decisión de estudiar física no fue del agrado de mis padres, ellos se convirtieron a lo largo del camino en el motor fundamental para que yo llegara al final de esta meta, de manera que el agradecimiento más sincero es hacia ellos, a Omar y Hermelinda que con su esfuerzo y confianza desmedida han sido mi luz en cada instante de la vida, por su infinito amor, por enseñarme que cuando se quiere hacer realidad nuestros sueños se debe perseverar para lograrlo. A mi hermana Daissy, porque desde que tengo memoria ha estado a mi lado y ha sabido comprenderme, sin ella los percances de la vida hubiesen sido más difíciles. A mi hermando Fernando, quien sin saber el camino que yo escogería más adelante, me enseñó desde muy niña a mirar hacia el cielo nocturno, a unir sus incontables puntos dibujando figuras fantásticas y llaves que abrirían en un futuro las puertas de mi destino. A toda mi familia, a mis abuelos, a mis tíos, en especial a Héctor Ramiro, sin ellos no hubiese sido posible llegar al final de esta meta.

Un agradecimiento especial al profesor Alberto Quijano Vodniza, mi asesor de tesis, a quien admiro y estimo profundamente, quien me guió durante la carrera hacia el maravilloso mundo de la astrofísica, por enseñarme a ver más allá; hacia el infinito cosmos, y por su determinante apoyo cuando decidí realizar este trabajo de grado.

Agradezco inmensamente al Dr. Abraham Luna Castellanos, fundador de la idea de este proyecto, por haberme permitido ser partícipe de ella, gracias por tantos conocimientos brindados y la confianza depositada en mi, por mostrarme que podía ver el Universo con los «ojos» de la radioastronomía, siempre con la mejor disposición y el tiempo para culminar este trabajo como mi segundo asesor estando a la distancia.

Gracias a mis profesores de la Universidad de Nariño por tantos conocimientos adquiridos, por mostrarme la belleza de la ciencia inmersa en la física. Las lecciones que aprendí no sólo fueron académicas, además hicieron que lograra llegar hasta el final con un crecimiento personal invaluable.

A mis compañeros de carrera y amigos, gracias por haber hecho que mi paso en la universidad haya tenido un sentido diferente, memorable e inolvidable, por su respaldo, porque cuando pensaba que no valía la pena tanto sacrificio, me recordaron que la recompensa al final sería más gratificante en cuanto más difícil es el camino.

CONSTRUCCIÓN DE UN RADIOTELESCOPIO DE 83 CENTÍMETROS DE DIÁMETRO EN LA BANDA DE 12 GIGAHERTZ EN EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo de la construcción de un radiotelescopio de 83 cm de diámetro en el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, el cual opera en la banda de frecuencia denominada Ku comprendida en el rango de 12 a 18 GHz del espectro electromagnético y que es capaz de realizar detecciones de la emisión del Sol.

Se realiza una revisión de los principales conceptos físicos necesarios para el estudio de la radioastronomía, la cual es considerada actualmente como una de las mejores técnicas para la investigación astronómica y representa un papel fundamental en el estudio del Universo. De igual manera se muestra una explicación detallada de las características más importantes de los elementos usados para la construcción del instrumento y de las herramientas más relevantes, como el sotfware para el almacenamiento y análisis de datos que funciona bajo el sistema operativo GNU/Linux. Una vez completada la construcción del radiotelescopio, se realiza la caracterización del mismo, con el fin de mostrar la eficiencia y funcionalidad del dispositivo.

Los temas abordados en la construcción de este instrumento, su uso y el análisis posterior de los datos muestran un alto contenido de multidiciplinariedad, relacionando conocimientos básicos en áreas como astrofísica, física, electrónica, desarrollo de software, ingeniería mecánica, y análisis de datos.

Palabras Clave: Antenas (Radiotelescopios), Telecomunicaciones, Radioastronomía.

CONSTRUCTION OF A RADIO TELESCOPE OF 83 CENTIMETERS IN DIAMETER AT THE 12 GIGAHERTZ BAND FOR THE ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE UNIVERSITY OF NARIÑO

ABSTRACT

This document describes the development of the construction of a radio telescope of 83 cm in diameter in the Astronomical Observatory of the University of Nariño, which operates in the frequency band called Ku, comprised in the range of 12 GHz to 18 GHz of the electromagnetic spectrum, and which is capable to make sun's emission detections.

A review is made of the main physical concepts necessary for the study of radio astronomy, which is currently considered one of the best techniques for astronomical research and which plays a fundamental role in the study of the Universe. Likewise, a detailed explanation of the most important characteristics of the elements and tools used for the instrument construction and software for storage and analysis of data, software running under the GNU / Linux operating system. Once the construction of the radio telescope was completed and in order to show the efficiency and functionality of the device, a complete characterization of it was carried out.

Topics addressed in the construction, its use and the subsequent analysis of data of this instrument, show a high content of multidisciplinary areas of relating basic knowledge, such as: astrophysics, physics, electronics, software development, mechanical engineering, and data analysis.

Keywords: Antennas (Radio telescopes), Telecommunications, Radio astronomy.

Contenido

1	Introducción			1
	1.1	Objeti	ivos	3
		1.1.1	Objetivo General	3
		1.1.2	Objetivos Específicos	3
2	Bre	ve His	toria de la Radioastronomía	4
3	Fun	damen	ntos de Radioastronomía	10
	3.1	Espect	tro Electromagnético	10
	3.2	Ondas	de Radio	12
		3.2.1	¿Por qué observar en esta longitud de onda?	12
		3.2.2	Espectro Radioeléctrico	17
	3.3	Emisić	ón de Radio en Astrofísica	20
	3.4	Radio	Continuo	20
		3.4.1	Emisión Térmica	20
		3.4.2	Radiación de Frenado	24
		3.4.3	Emisión Sincrotrón	24
	3.5	Líneas	Espectrales	25
		3.5.1	Línea de Hidrógeno Neutro de 21 cm	25
	3.6	Radio	Emisiones Solares	26
	3.7	Conce	ptos de Radioastronomía	28
		3.7.1	Intensidad	28
		3.7.2	Densidad de flujo	29
		3.7.3	Temperatura de Brillo	29
4	;Qı	ié es u	n Radiotelescopio?	30
	4.1	Estruc	etura de un Radiotelescopio	30
	4.2	Anten	a	31
		4.2.1	Tipos de antenas	32
	4.3	Introd	ucción a la Teoría de Antenas	33
		4.3.1	Temperatura de Antena	34
		4.3.2	Patrón de Antena	35
		4.3.3	Resolución Angular	39

		4.3.4	Ángulo Sólido de una Antena 4
		4.3.5	Eficiencia de Haz
		4.3.6	Directividad
		4.3.7	Ganancia 44
		4.3.8	Polarización
		4.3.9	Área efectiva
	4.4	Teoría	del Receptor
		4.4.1	Amplificador de RF 44
		4.4.2	Mezclador y Oscilador Local
		4.4.3	Amplificador de FI
		4.4.4	Detector $\ldots \ldots 50$
		4.4.5	Integrador
	4.5	Regist	ro de datos $\ldots \ldots 5$
5	Cor	nstrucc	ión de un Radiotelescopio de 83 cm de Diámetro 53
	5.1	Eleme	ntos que conforman el Radiotelescopio
	5.2	Módul	lo de Antena
		5.2.1	Antena Parabólica Offset
		5.2.2	Especificaciones Técnicas Antena Parabólica Offset 54
	5.3	Detect	tor LNB (Low Noise Block) $\ldots \ldots 5'$
		5.3.1	Funcionamiento de un LNB
		5.3.2	Especificaciones Técnicas LNB
	5.4	Busca	dor de satélites
		5.4.1	Especificaciones Técnicas Buscador de satélites 6
	5.5	Circui	to Amplificador
	5.6	Tarjet	a Arduino UNO R3 66
		5.6.1	Especificaciones Técnicas Arduino Uno R3
	5.7	Modifi	icación de Algunos Elementos que Conforman el Radiotelescopio . 6
		5.7.1	Modificación del Buscador de Satélites 6
		5.7.2	Circuito Amplificador
		5.7.3	Instalación Tarjeta Arduino Uno R3
		5.7.4	Arduino Uno con Python7878
	5.8	Ensan	ble del Radiotelescopio 8
		5.8.1	Armado de la Antena Parabólica Offset
		5.8.2	Acople de los demás Componentes
6	Car	acteriz	zación del Radiotelescopio 84
	6.1	Forma	esperada para el haz observado
	6.2	Cálcul	os teóricos de los parámetros del radiotelescopio
	6.3	Cálcul	os experimentales de los parámetros del radioteles copio 8'
		6.3.1	Análisis de datos del 17 de diciembre de 2017 8
		6.3.2	Análisis de datos del 23 de Febrero de 2018

Conclusiones	96
Recomendaciones	97
Bibliografía	98

Lista de Tablas

3.1	Bandas del espectro radioeléctrico.	18
4.1	Comparación parámetros de diferentes tipos de antena	46
5.1	Especificaciones principales de la Antena Parabólica Offset	56
5.2	Especificaciones principales del LNB	58
5.3	Especificaciones principales del Sat Finder.	61
5.4	Especificaciones principales Amplificador Operacional LM741	62
5.5	Especificaciones principales Tarjeta Arduino	64
6.1	Coordenadas 17/12/2017 12h:58m:38s UTC	88
6.2	Resultados del ajuste gaussiano.	90
6.3	Resultados teóricos y experimentales de los parámetros del radiotelescopio con su	
	respectivo error relativo porcentual para los datos del 17/12/2017. \ldots \ldots	92
6.4	Coordenadas 23/02/2018 14h:46m:38s UTC	93
6.5	Resultados del ajuste gaussiano.	94
6.6	Resultados teóricos y experimentales de los parámetros del radiotelescopio con su	
	respectivo error relativo porcentual para los datos del $23/02/2018$	95

Lista de Figuras

2.1	Karl Jansky, con su antena llamada «Jansky's merry-go-round», conectada a un receptor que operaba a 20.5 MHz Imagen tomada de Observatorio Nacional de	
	Radioastronomía NRAO/AUI.	5
2.2	Antena parabólica de 9.5 metros de diámetro de Reber. Imagen tomada de	
	Observatorio Nacional de Radioastronomía NRAO/AUI.	6
2.3	Arno Penzias y Robert Wilson con la antena Holmdel, Laboratorios Bell, 1965. Crédito: Bell Labs	8
3.1	Diagrama del espectro electromagnético mostrando el tipo, longitud de onda con	
	ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro. Dominio público, Wikimedia Commons.	11
3.2	Esquema aproximado de la opacidad atmosférica (o transmitancia) a varias longitudes de onda de la radiación electromagnética, incluyendo características de dicha	
	opacidad. Imagen Fuente de esta investigación. $\hfill \ldots \hfill \ldots$	13
3.3	Galaxia del Remolino NGC 5194 en diferentes longitudes de onda. Collage de imágenes, realizado con el programa $GIMP$ (GNU Image Manipulation Program).	14
3.4	Multiwavelength Milky Way. National Aeronautics and Space Administration,	
	Goddard Space Flight Center. 2010	16
3.5	Bandas del espectro radioeléctrico, según su uso más frecuente.EncyclopediaBritannica, Inc. Todos los derechos reservados.2013	18
3.6	Intensidad de fuentes de radiación como función de la frecuencia, la línea gris indica lo que detecta la banda Ku. Imagen tomada de Manual de Construcción de un	
	Radiotelescopio en la Banda de 12GHz para Usos Docentes - INAOE	19
3.7	Curvas de radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas. Imagen fuente de	22
0.0	esta investigación.	23
3.8	Mecanismo de emisión de la línea espectral de 21 cm del Hidrógeno neutro. Imagen	าด
20	nuente de esta investigación.	20
3.9	Estructura del Sol. Dominio público, Wikimedia Commons	27
3.10	Energía dentro de un ángulo sólido $d\Omega$ que atraviesa una área dA cuya normal n	00
	torma un angulo θ con la dirección considerada k . Imagen fuente de esta investigación.	28

4.1 Esquema partes principales de un radiotelescopio. Imagen fuente de esta investigación. 31

4.2	La figura (A) muestra una antena emisora, ensamblada a un generador permite la amisión de ondes. La Figura (B) muestra una antena receptora que conectada al	
	recentor contas. La Figura (D) intestra una antena receptora que conectada al	
	invostigación	39
13	$I_{2} = f_{2} g_{2} g_{1} g_{2} g_{1} g_{2} g_{1} g_{2} g_{2} g_{1} g_{2} g_{2} g_{1} g_{2} g_{2} g_{2} g_{1} g_{2} g_$	52
4.0	dimensiones. La mayoría de la radiación está contanida en el lábulo principal	
	animensiones. La mayoria de la radiación esta contenida en el lobulo principal	
	acompanado también por radiación en los fobulos menores. Entre los fobulos están los	
	KDAUS John ANTENNAS	26
1 1	RRAUS, John ANTENNAS	50
4.4	Fation normalizado de potencia en coordenadas polares con $F_n = 1$ a $b = 0$, donde	
	$F_n = 0.5$ corresponde a la lintad de la potencia maxima. Imagen fuente de esta	37
15	(a) Objeteg aug geen dentre del migme her mimerie ne se nueden distinguin	51
4.0	(a) Objetos que caen dentro del mismo naz primario no se pueden distinguir, (b) Objetos guperpuestos que no co pueden regeluen u (c) Objetos penejelmente	
	(b) Objetos superpuestos que no se pueden resolver y (c) Objetos parcialmente	40
16	Tinga de polorización de une ende electromagnética. Deminio Dública Wilimedia	40
4.0	Tipos de polarización de una onda electromagnetica. Dominio Publico Wikimedia	15
17	Diagrama de un recentor superheteradina tínica Dominia Pública Wikimadia	40
4.1	Commons	17
		41
5.1	Esquema de las partes principales de un Radiotelescopio. Imagen fuente de esta	
	investigación.	53
5.2	Esquema de una antena parabólica Offset, la superficie se encarga de concentrar la	
	radiación incidente en su foco. Imagen fuente de esta investigación	54
5.3	Antena parabólica offset usada para la construcción de un radioteles copio de 83 cm $$	
	de diámetro mayor.	55
5.4	Datos de antena, dados por el programa Calculador de parábolas WiFi x Challenger	
	<i>V.3.0.</i>	56
5.5	Esquema partes principales de un LNB	58
5.6	LNB (Low Noise Block). Dominio público, Wikipedia.	59
5.7	Estructura interna de un LNB. Dominio público, Wikipedia	59
5.8	Buscador Satelital ASKA SF - 9522	61
5.9	Amplificador Operacional LM741	62
5.10	Esquema del Amplificador Operacional LM741. Dominio público, Wikimedia Commons.	63
5.11	Parte frontal, tarjeta arduino uno R3	65
5.12	Parte posterior, tarjeta arduino uno R3	65
5.13	Esquema arduino uno, muestra las partes principales de la placa. HERNÁNDEZ	
	César. INFOOTEC.NET Copyright Blog sitio Web. 2017	66
5.14	Parte posterior del Sat Finder, tapa Principal	68
5.15	Interior del Sat Finder, cuando se retira la tapa principal	68
5.16	Modificación Sat Finder, donde se coloca el interruptor al zumbador. \ldots \ldots \ldots	69
5.17	Modificación Sat Finder, interceptando señal en la base del galvanómetro.(Positivo	
	$= Rojo; Negativo = Negro) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	70

5.18	Fuente para el Sat Finder con pilas de 9 V cada una, con una salida aproximada de 18 VDC	71
5.19	Esquema del Circuito Amplificador, en la parte superior izquierda se tiene el esquema	
	del AO LM741	72
5.20	Protoboard compatible con arduino, referencia DFR0019	72
5.21	Circuito amplificador en una protoboard normal, como primera prueba. \ldots .	73
5.22	Circuito Amplificador construido en la protoshield compatible con Arduino	73
5.23	Circuito amplificador listo para ser acoplado con la tarjeta arduino. \ldots \ldots \ldots	74
5.24	Fuente del circuito amplificador.	74
5.25	Plataforma del software de Arduino para seleccionar el tipo de tarjeta	76
5.26	Selección del puerto en Arduino	77
5.27	Partes de una antena parabólica offset. Dominio público, Wikimedia Commons	81
5.28	Radiotelescopio completamente armado	83
5.29	Interfaz del programa Spyder, editor de lenguaje de programación $python.\ .\ .\ .$	83
6.1	Patrón teórico de radiación para una apertura circular con una iluminación uniforme. Imagen tomada de MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE UN RADIOTELESCOPIO	
6.2	<i>EN LA BANDA DE 12GHZ PARA USOS DOCENTES - INAOE</i> Potencia registrada de la señal del Sol en decibeles (dB), en función del tiempo hora	85
0.2	local $17/12/2017$.	88
6.3	Potencia de la señal registrada del Sol en miliWatts, en función del ángulo en grados.	89
6.4	Ajuste de la gaussiana al patrón de potencia normalizado.	90
6.5	Potencia registrada de la señal del Sol en decibeles (dB), en función del tiempo hora local 23/02/2018	93
66	Potencia de la señal registrada del Sol en miliWatts, en función del ángulo en grados	93
6.7	Ajuste de la gaussiana al patrón de potencia normalizado.	94
Τ1	Instalación del instrumente en el Observatorio Astronómico UDENAR	101
1.1 1.0	Instalación del radiotalescopio en el Observatorio Astronómico UDENAR.	101
1.2 1.2	Distatación del fadiotelescopio en el Observatorio Astronomico ODENAR.	101
1.0 I 4	Base del radiotelescopio terminada	102
1.4 I 5	Vista superior dende se observa el buscador de satélites que sobresale	102
1.0	on la tana de la caja	109
I 6	Disposición de los elementos electrónicos en el interior de la caja	102 102
1.0		102
II.1	Datos 11 de noviembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo. <i>Coordenadas</i> <i>Azimut</i> :120.6° - <i>Altura</i> :51.3°	103
II.2	Datos 11 de noviembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo. <i>Coordenadas</i>	
	$Azimut: 120.6^{\circ} - Altura: 51.3^{\circ}$.	104
II.3	Datos 19 de noviembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo. Coordenadas	
	Azimut:131.7° Altura:57.9°	104
II.4	Datos 19 de noviembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo. Coordenadas	
	Azimut:131.7° Altura:57.9°	105

II.5	Datos 19 de diciembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo.	Coordenadas
	$Azimut: 137.4^{\circ} - Altura: 55.7^{\circ}$	
II.6	Datos 19 de diciembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo.	Coordenadas
	$Azimut: 137.4^{\circ}$ - $Altura: 55.7^{\circ}$	
II.7	Datos 20 de diciembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo.	Coordenadas
	$Azimut: 119.6^{\circ} - Altura: 34.1^{\circ}$	
II.8	Datos 20 de diciembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo.	Coordenadas
	$Azimut: 119.6^{\circ} - Altura: 34.1^{\circ}$	
II.9	Datos 12 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo.	Coordenadas
	$Azimut: 119.7^{\circ} - Altura: 59.4^{\circ}$	
II.10	Datos 12 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo.	Coordenadas
	$Azimut: 119.7^{\circ} - Altura: 59.4^{\circ}$	
II.11	Datos 14 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo.	Coordenadas
	$Azimut: 119.6^{\circ} - Altura: 60.8^{\circ}$	
II.12	2 Datos 14 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo.	Coordenadas
	$Azimut: 119.6^{\circ} - Altura: 60.8^{\circ}$	
II.13	Datos 20 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo.	Coordenadas
	$Azimut: 111.5^{\circ} - Altura: 56.1^{\circ}$	
II.14	Datos 20 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo.	Coordenadas
	$Azimut: 111.5^{\circ} - Altura: 56.1^{\circ}$	
II.15	Datos 21 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo.	Coordenadas
	$Azimut: 110.2^{\circ} - Altura: 54.9^{\circ}$	
II.16	Datos 21 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo.	Coordenadas
	$Azimut: 110.2^{\circ} - Altura: 54.9^{\circ}$	

Lista de Anexos

I Instalación del Radiotelescopio en el Observatorio Astronómico d		
	Universidad de Nariño	101
Π	Gráficas de Datos Registrados	103

Glosario

Α

altura

Àngulo comprendido entre el horizonte celeste y la posición del objeto astronómico medido a lo largo de la vertical, definiéndose como positivo por encima del horizonte y negativo por debajo. Su valor varía entre -90° (en la dirección del Polo Sur) y +90° (en la dirección del Polo Norte). 90, 93

azimut

Es el ángulo o longitud de arco medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador situado en alguna latitud. Se mide en grados desde el punto cardinal Norte en el sentido de las agujas del reloj. 90, 93

\mathbf{B}

banda

Son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético, el cual se divide en segmentos o grupos con el fin de realizar su estudio de manera más eficiente. 10, 12, 16, 18–20, 28, 35, 48, 50, 55, 58, 59

\mathbf{C}

corona

Es la capa más externa del Sol, está compuesta de plasma y se extiende más de un millón de kilómetros desde su origen sobre la cromósfera. Puede observarse desde la Tierra durante un eclipse solar total o utilizando dispositivos como el coronógrafo . 28

cromósfera

Es una capa delgada de la atmósfera del Sol por encima de la fotósfera y por debajo de la corona y está compuesta principalmente por hidrógeno y Helio. 28, 100

Ι

infrarrojo

La radiación infrarroja, o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 0,7 hasta los 1000 micrómetros. 11, 13, 18

\mathbf{M}

medio interestelar

Es el contenido de materia y energía que existe entre las estrellas dentro de una galaxia. Contiene gas y partículas sólidas de tamaño microscópico denominado polvo. 16

\mathbf{N}

nebulosa

Son regiones del medio interestelar constituidas por gases (principalmente hidrógeno y helio) además de elementos químicos en forma de polvo cósmico, tienen una importancia cosmológica notable porque se consideran los lugares donde nacen, por fenómenos de condensación y agregación de la materia, los sistemas solares similares al nuestro. 20, 25

\mathbf{P}

púlsar

Un púlsar del acrónimo en inglés de pulsating star, que significa «estrella que emite radiación muy intensa a intervalos cortos y regulares» es una estrella de neutrones que emite radiación periódica. Los púlsares poseen un intenso campo magnético que induce la emisión de estos pulsos de radiación electromagnética a intervalos regulares relacionados con el periodo de rotación del objeto. 8, 25

\mathbf{R}

radiogalaxia

Galaxia que irradia energía con gran potencia en forma de ondas de radio, la emisión desde las radiogalaxias se debe a la radiación sincrotrónica, un método por el que los átomos y las moléculas irradian energía. 25

rayos gamma

Radiación electromagnética de muy alta frecuencia y muy corta longitud de onda, de 10^{-11} a 10^{-14} metros. Son la forma más energética y penetrante de radiación

XX

electromagnética. Su origen reside mayormente en fuentes discretas como estrellas de neutrones envueltas en campos magnéticos, algunos quásares o galaxias activas. 11, 13, 16, 18

rayos X

Son un tipo de radiación electromagnética de alta energía que surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones, tienen longitudes de onda comprendidas entre 10 a 0,01 nanómetros. 13, 18

\mathbf{S}

supernova

Fase en la vida de una estrella muy masiva en la que ha agotado todo el combustible de sus capas internas, por lo que se vuelve inestable y se contrae bruscamente, entonces sufre una gigantesca explosión con gran liberación de energía, pudiendo incrementar su luminosidad varios miles de veces. 15, 20, 25

V

ventanas atmosféricas

Cada uno de los intervalos de frecuencia en los que una radiación procedente del exterior de la Tierra puede atravesar la atmósfera sin ser absorbida y, así, ser detectada en la superficie de la Tierra. 13

Capítulo 1 Introducción

La mayor parte de la información de los cuerpos celestes se obtiene a través del estudio de la radiación que éstos emiten a lo ancho de todo el espectro electromagnético, éste se divide convencionalmente en: rayos gamma, rayos X, ultravioleta (UV), visible, infrarrojo (IR), microondas y ondas de radio.[12]

La radioastronomía estudia los cuerpos celestes a través de sus emisiones en el dominio de frecuencias relativamente bajas que van desde 3 KHz hasta 300 GHz (100 Km a 1 mm en longitud de onda), es decir en la región de radio del espectro electromagnético. Para obtener la información que contiene la emisión de los objetos celestes, se diseñan diversos instrumentos con el fin de captar distintas longitudes de onda. El instrumento capaz de estudiar el Universo en la banda de radio del espectro electromagnético se denomina *radiotelescopio*.

Los avances realizados con el surgimiento de la radioastronomía han permitido entender muchos de los misterios del Universo, por ejemplo el fondo de radiación de microondas, que es la señal remanente del nacimiento del Universo; el tiempo anterior a las primeras galaxias, estrellas y su nacimiento son también un campo de estudio para los últimos radiotelescopios. Dado que las ondas de radio pueden penetrar el polvo interestelar, los científicos utilizan técnicas avanzadas de radioastronomía para estudiar regiones del espacio que no podrían ser vistas en las frecuencias de la luz visible.

Las primeras técnicas de observación astronómicas en desarrollarse fueron para ciertas longitudes de onda entre ellas, la luz visible y radio, debido a un factor muy importante que relaciona la transparencia que tiene la atmósfera terrestre a dichos rangos del espectro electromagnético, esta ventaja permite estudiar el Universo desde la superficie de la Tierra. Además los radiotelescopios no se ven muy afectados por las condiciones atmosféricas, dado que el cielo de la ciudad de San Juan de Pasto tiene temporadas de gran nubosidad, un radiotelescopio resulta de gran utilidad para dichas condiciones climáticas.[6] El siguiente trabajo muestra la construcción de un radiotelescopio de 83 cm de diámetro en el observatorio astronómico de la Universidad de Nariño, que permite tener una herramienta para el estudio de la radioastronomía, se desarrolla un análisis de datos obtenidos de la emisión del Sol con el fin de realizar la caracterización del instrumento. En el capítulo 2 se expone una breve introducción histórica de la radioastronomía. Los fundamentos teóricos básicos y sus aplicaciones se muestran en el capítulo 3. En el capítulo 4 se realiza una descripción del funcionamiento de un radiotelescopio. Posteriormente en el capítulo 5 se aborda una descripción en detalle de la construcción del instrumento y se desarrolla el proceso general para la adquisición y almacenamiento de datos obtenidos del Sol. Finalmente en el capítulo 6 se muestra el análisis de datos y el cálculo de los parámetros de caracterización del radiotelescopio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Construir un radiotelescopio de 83 cm de diámetro en el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño que opera en la banda de 12 GHz denominada banda Ku, que permita estudiar emisiones del Sol.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los fundamentos físicos básicos necesarios para el estudio de la radioastronomía.
- Construir el sistema de observación, funcionamiento y registro del radiotelescopio.
- Realizar el registro de la radiación de emisión del Sol, que permita hacer la caracterización del instrumento y mostrar su eficiencia.

Capítulo 2

Breve Historia de la Radioastronomía

Desde la antigüedad, la humanidad se ha maravillado al ver el cielo nocturno, ha tratado de entender lo que está más allá del firmamento y se ha interesado por descubrir los más profundos secretos que guarda nuestro vasto Universo.

Tarde o temprano cada persona tiene una experiencia personal con el cielo estrellado. Cuando no hay luces de la calle o el polvo de la ciudad velando las estrellas y todavía hay las noches negras en el campo, son estos momentos que nos encontramos en un estado de ánimo pensativo. Al mirar las estrellas nuestros pensamientos se vuelven a preguntas sobre la creación del Universo y las condiciones del Sol, la Luna, los planetas y, finalmente, nuestro lugar en el cosmos. En este momento de reflexión, nuestros ojos están abiertos a observar los fenómenos celestes.¹

Durante mucho tiempo, el hombre conoció el Universo sólo a través de sus ojos y estudió los cuerpos celestes mediante la luz visible, la cual constituye sólo una pequeña parte de un fenómeno mucho mas amplio conocido como radiación electromagnética. No fue hasta las últimas décadas, que el deseo de observar mas allá de lo que se ve a simple vista permitió el desarrollo de instrumentos de observación utilizando todo el espectro electromagnético.

En este capítulo se describe el nacimiento de uno de los instrumentos básicos en la observación astronómica, que ha sido la herramienta fundamental para desentrañar muchos de los misterios del Universo y que dio origen a lo que hoy conocemos como radioastronomía.

La historia de la radioastronomía comienza a finales del año 1930, cuando al joven ingeniero americano Karl Jansky, quien trabajaba en los laboratorios Bell en Holmdel, Nueva Jersey (Estados Unidos), se le asignó la tarea de investigar la dirección de la

¹GÜNTER D, Roth. Handbook of Practical Astronomy, Why Astronomy? Springer, 2009

que provenían las interferencias en las ondas de radio en el servicio transatlántico de radiotelefonía. Para ello Jansky construyó una antena de 30 metros de largo por 4 metros de alto montada en cuatro ruedas que corrían sobre un riel circular, este instrumento fue diseñado para recibir ondas de radio a una frecuencia de 20.5 MHz, equivalente a una longitud de onda de 14.6 metros. Figura2.1



Fig. 2.1: Karl Jansky, con su antena llamada «Jansky's merry-go-round», conectada a un receptor que operaba a 20,5 MHz. Imagen tomada de Observatorio Nacional de Radioastronomía NRAO/AUI.

Como ocurre muchas veces en el mundo de la ciencia, el descubrimiento de las ondas de radio de origen extraterrestre se hizo mientras se investigaba algo diferente. Tras estudiar los resultados de su observación proveniente de todas direcciones durante varios meses, Jansky identificó tres fuentes de ruido, a pesar de que una fracción significativa del ruido estático podía ser atribuido a tormentas locales o distantes, todavía quedaba una componente importante que se denominó «ruido constante de naturaleza desconocida». Después de un año de investigar el tercer tipo de ruido en la primavera de 1932 Jansky llegó a la conclusión de que la fuente de dicha emisión provenía de la Vía Láctea y con más intensidad en la dirección central de la Galaxia, es decir de la constelación de Sagitario.

La noticia causó gran conmoción entre el público y se hicieron múltiples conjeturas sobre el origen de aquellas señales, sin embargo el propio Jansky se dio cuenta que no había nada de misterioso en ellas y comprendió que muchos cuerpos celestes, además de irradiar energía bajo forma de luz visible, lo hacen también bajo forma de ondas de radio, convirtiéndose en la primera observación radioastronómica.

Tuvo que pasar más de una década hasta que Grote Reber, un ingeniero de radiocomunicaciones se puso a la tarea de construir en el jardín trasero de su casa una antena parabólica de 9.5 metros de diámetro con un receptor de radio acoplado en su foco. Esta antena era movible sólo en declinación y dependía del movimiento terrestre de rotación para el barrido en ascensión recta, este dispositivo es considerado como el primer radiotelescopio, en la figura 2.2 se muestra dicho instrumento. En 1944 publicó sus resultados en el Astrophysical Journal realizando el primer mapa de radio de la Vía Láctea.



Fig. 2.2: Antena parabólica de 9.5 metros de diámetro de Reber. Imagen tomada de Observatorio Nacional de Radioastronomía NRAO/AUI.

A pesar de la relevancia de los descubrimientos de Jansky y Reber, éstos quedaron estancados durante la segunda guerra mundial, no obstante, el desarrollo de la radio ciencia pasó a otros investigadores cuyos propósitos eran muy distintos al astronómico. En tiempos de guerra fue urgente tener una tecnología de detección de aviones enemigos. Con este propósito, se desarrollaron el sistema RADAR (RAdio Detection And Ranging)² que permite detectar objetos y determinar distancias. Así comenzó una revolución en la construcción de dispositivos de radiofrecuencia, con un trabajo notable por parte de ingenieros y científicos sobre todo de Gran Bretaña y Estados Unidos, incluyendo Alemania y Japón, para desarrollar circuitos y componentes que funcionaran a altas frecuencias, de 1 hasta 10 GHz. Décadas después, estos desarrollos tecnológicos contribuyeron a un nacimiento de nuevas aplicaciones en otras áreas, en particular en radioastronomía y telecomunicaciones.^{3,4}

Desde la década de los años cincuenta se detectaron fuentes de radioemisión que fueron catalogadas e identificadas. En 1963, la permanente investigación en este campo llevó al descubrimiento de una clase de radiofuentes estelares llamadas quásares, debido a que presentaban desplazamientos hacia el rojo de una magnitud sin precedentes parecían encontrarse a distancias enormes de la Tierra.

Poco después en 1965, los radioastrónomos estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson quienes al igual que Jansky eran investigadores de los laboratorios Bell, anunciaron el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo $(CMB)^5$ que tiene muchas implicaciones para las teorías del origen del Universo y su evolución, el instrumento utilizado por Penzias y Wilson se indica en la figura 2.3.

En el año 1963, en el norte de la isla Arecibo (Puerto Rico) se construyó el observatorio astronómico denominado National Astronomy and Ionosphere Center (NAIC) el cual tiene una antena principal de 305 metros de diámetro y está administrado por la Universidad de Cornell. Desde su puesta en marcha se han realizado grandes descubrimientos como el del 7 de abril de 1964 el equipo de Gordon H. Pettengill determinó que el período de rotación de Mercurio no era de 88 días como se creía hasta entonces, sino de tan sólo 59 días.

En 1968 Jocelyn Bell observó un tipo nuevo de radiofuente, se le llamó púlsar por sus siglas en inglés de *pulsating star*, luego identificado como una estrella de neutrones que emite radiación muy intensa a intervalos cortos y regulares.

 $^{^{2}}$ Término derivado del acrónimo inglés Radio Detection And Ranging, es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor. PEREZ, Constantino. *RADAR*.Departamento de Ingeniería de Comunicaciones Universidad de Cantabria. 2010.

³KRAUS, John. RADIOASTRONOMY. MCGraw Hill. 2001.

⁴KRAUS, John. ANTENNAS. MCGraw Hill . 1997.

⁵La Radiación Cósmica de Fondo, o Radiación Cósmica de Microondas, por sus siglas en inglés Cosmic Microwave Background, es una forma de radiación electromagnética, que llena el Universo por completo, representa la energía remanente del Big Bang que dio origen al Universo. TORRES, SERGIO. *INVESTIGANDO EL ORIGEN DEL UNIVERSO CON EL EXPLORADOR DEL FONDO CÓSMICO (COBE)*. Exploremos el Universo. 2007.



Fig. 2.3: Arno Penzias y Robert Wilson con la antena Holmdel, Laboratorios Bell, 1965. Crédito: Bell Labs

Entre 1970 y 1990 la interferometría fue la técnica desarrollada, más importante de la radioastronomía. Consiste en combinar la radiación proveniente de diferentes receptores o antenas para obtener una imagen de mayor resolución. Su implementación es más difícil cuanto más corta es la longitud de onda, debido a la mayor precisión mecánica que se requiere al utilizar dichas longitudes.⁶

Uno de los interferómetros más conocidos es el Very Large Array (VLA), compuesto por un conjunto de 27 antenas parabólicas de 25 metros de diámetro cada una y que están alineadas en tres brazos de 21 km cada uno, se encuentra en Nuevo México, Estados Unidos.⁷

La necesidad de aumentar significativamente la sensibilidad y la resolución angular en este rango, impulsó la construcción del gran interferómetro Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en Chile. Consiste en 66 reflectores parabólicos de 7 metros y 12 metros de diámetro destinados a observar longitudes de onda milimétricas y submilimétricas.⁸

Para el estudio de ondas milimétricas también es conocido el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano o GTM) es un radiotelescopio de plato único y movible más grande del mundo diseñado para hacer

⁷VLA. *National Radio Astronomy Observatory*. Welcome to the Very Large Array. 2017.

⁶FIELDING, John. AMATEUR RADIO ASTRONOMY. Radio Society of Breat Britain. 2008.

⁸ALMA (ESO/NAOJ/NRAO). *ALMA, UNA COLABORACIÓN GLOBAL*. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). 2017.

observaciones astronómicas en longitudes de onda de 0.85 a 4 mm. Es un proyecto conjunto entre el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y la Universidad de Massachusetts, representa el instrumento científico más grande y complejo construido en México, situado en la cima del Volcán Sierra Negra a una altitud de 4600 metros, el GTM recientemente ha iniciado la exploración de los procesos físicos que controlan la formación y evolución de sistemas planetarios, estrellas, hoyos negros y galaxias a través de los 13.7 mil millones de años de historia del Universo.⁹

El siguiente gran proyecto internacional es la construcción del radiotelescopio Square Kilometre Array (SKA), el cual surge de la necesidad de mejorar enormemente la capacidad de observación en longitudes de onda de metros y centimétricas, en sensibilidad, velocidad de observación y resolución angular, para extender la investigación a zonas más profundas del espacio que muestran las épocas más tempranas de la formación del Universo. Para ello el complejo contará con aproximadamente 3.000 telescopios, de 15 metros de diámetro cada uno. El radiotelescopio se instalará en territorio de Australia y Sudáfrica y culminará hasta el año 2020.¹⁰

De este modo surge la astronomía moderna, donde las investigaciones hacen especial énfasis en el enfoque del estudio de multifrecuencias, que consiste en observar al Universo ya no sólo en el espectro de luz visible, sino en todas las bandas del espectro electromagnético.

No obstante, muchos fenómenos emiten radiación con mayor intensidad en la banda de radio y no hay manera de observarlos en el óptico u otras bandas del espectro electromagnético, por lo tanto la radioastronomía juega un papel fundamental en el estudio del Universo a través de la captación y análisis de las ondas de radio.

⁹GTM, Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano. *Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano*. 2017.

¹⁰SKA. Exploring the Universe with the world's largest radio telescope. SQUARE KILOMETRE ARRAY. 2017.

Capítulo 3

Fundamentos de Radioastronomía

En este capítulo se hace una introducción al estudio de la radioastronomía, abarcando los temas más relevantes que permitan entender de mejor manera el desarrollo de este trabajo.

En las últimas décadas la radioastronomía ha demostrado tener una utilidad sin precedentes en la contribución del avance del conocimiento de nuestro Universo, gracias a su desarrollo ha sido posible obtener información de cuerpos distantes y de nuestra propia Galaxia, su aplicación es una de las técnicas más extendidas actualmente en el ámbito astronómico.

Se puede definir **Radioastronomía** como la rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro.¹

Para entender como funciona y de que se trata el estudio de la radioastronomía, primero se hace una descripción del espectro electromagnético, también se exponen las ventajas que tiene respecto a otras técnicas y finalmente se hace una introducción a los fundamentos teóricos.

3.1 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético representa la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Se extiende desde radiaciones con longitud de onda pequeña como los rayos cósmicos y rayos gamma súper energéticos, hasta ondas con gran longitud de onda como las de radio, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos.²

¹ECURED. Radioastronomía. ¿Qué es el Espectro Electromagnético?. 2017

²FRENZEL, Louis L. *Sistemas electrónicos de comunicaciones. México.* Espectro electromagnético. 2003.



La figura 3.1 muestra un diagrama de los distintos rangos de longitud de onda del espectro electromagnético.

Fig. 3.1: Diagrama del espectro electromagnético mostrando el tipo, longitud de onda con ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro. Dominio público, Wikimedia Commons.

En el Universo encontramos diferentes procesos físicos que emiten radiación a diferentes longitudes de onda, cada tipo de objeto astronómico emite con mayor intensidad en una o varias bandas espectrales en particular. Por ello cada región del espectro electromagnético requiere técnicas particulares para su estudio.

La astronomía, desde la antigüedad, fundamentó sus bases en el estudio de la parte del espectro electromagnético de la luz visible, cuya longitud de onda está comprendida entre los 4×10^{-7} m y 7×10^{-7} m, en la que nuestro sentido de la visión es un excelente detector. Con la ayuda de determinados elementos ópticos, se ha logrado obtener información para configurar modelos que nos acercan a la comprensión del Universo. Sin embargo desde el desarrollo de la radioastronomía se abrieron las puertas a la parte de bajas frecuencias del espectro electromagnético, que comprende longitudes de onda entre los 10^5 m a 10^{-3} m, conocidas como ondas de radio y que han permitido conocer el Universo de una forma distinta.[6]

Actualmente se usan diferentes tipos de instrumentos para el estudio del cosmos, se intenta obtener información en muchas bandas espectrales, con el fin de adquirir un conocimiento más amplio sobre el vasto Universo en el que nos encontramos.

3.2 Ondas de Radio

Las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética, que ocupa el rango de las longitudes de onda más grandes del espectro electromagnético, comprende desde los 3 kHz de frecuencia, con una longitud de onda de 100 km, hasta los 300 GHz de frecuencia, con una longitud de onda de 1 mm. Las ondas de radio reciben también el nombre de *radiofrecuencia* **RF**, se localizan en una parte del espectro electromagnético denominado **espectro radioeléctrico**.³

3.2.1 ¿Por qué observar en esta longitud de onda?

La longitud de onda de radio tiene ciertas ventajas sobre otro tipo de radiación. Para empezar, comparte con el óptico el privilegio de ser observada desde la Tierra, debido a que puede atravesar la atmósfera terrestre. Nuestra atmósfera absorbe la mayoría de la radiación incidente del espacio, que resulta ser una de las razones por la que se desarrolló la vida en el planeta como la conocemos, además nos protege de radiación nociva como la de más alta energía.

Una pequeña fracción del espectro electromagnético es observable desde la Tierra, dado que atraviesa las denominadas ventanas atmosféricas y puede ser detectado en la superficie terrestre. La luz visible, una porción de la radiación infrarroja y la mayoría de las ondas de radio, tienen esta característica, de penetrar en la atmósfera, sin ser reflejadas o absorbidas, lo cual facilita su estudio.

La propiedad óptica de la atmósfera que restringe el paso de la radiación electromagnética se denomina **opacidad atmosférica**. La figura 3.2 muestra un diagrama de la opacidad atmosférica de la Tierra en función de la longitud de onda de la radiación incidente.

Entre las principales fuentes de opacidad en la atmósfera terrestre se encuentran el H_2O , N_2 , O_2 , CO_2 , entre otros. El vapor de agua y el dióxido de carbono, absorben la mayor parte de la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta es absorbida en la capa de ozono, mientras que los rayos gamma y los rayos X son absorbidos por las moléculas de nitrógeno y oxígeno que constituyen nuestra atmósfera.

Otra ventaja muy importante de las ondas de radio, es que debido a su baja energía no interfieren significativamente con el material que se encuentran a su paso. En astronomía este hecho adquiere una relevancia considerable debido a que hay objetos en el Universo que no son visibles en el espectro óptico y necesitan ser estudiados a longitudes de onda mas largas como el infrarrojo, el milimétrico, o radio.

³Ventanas al Universo. Ondas de Radio. Blog sitio Web. 2017



Fig. 3.2: Esquema aproximado de la opacidad atmosférica (o transmitancia) a varias longitudes de onda de la radiación electromagnética, incluyendo características de dicha opacidad. Imagen Fuente de esta investigación.

Las longitudes de onda de radio no son fuertemente dispersadas por el material que se encuentra a su paso, por ello son especialmente útiles para estudiar objetos que se encuentran en el interior de nubes de gas y de polvo, permitiendo así el estudio de objetos en regiones densas y oscurecidas, como regiones de formación estelar, y nubes moleculares. La radiación en el rango visible de esos cuerpos está totalmente absorbida o dispersada por el material, por lo que no se pueden observar con telescopios ópticos.[4]

Resulta por tanto que la radioastronomía tiene un interés estratégico fundamental para los astrónomos actuales y permite conocer de manera más detallada la información proveniente de los cuerpos en el espacio. En las últimas décadas, la astronomía se ha beneficiado de una enorme ampliación de la cobertura del espectro electromagnético por instrumentos de alta tecnología, lo cual ha permitido obtener información relevante de ciertos objetos, aunque se encuentren a grandes distancias astronómicas, los radiotelescopios forman parte de esos instrumentos que han aportado en estos avances tan importantes en el conocimiento de las galaxias y del universo en general. En la figura 3.3 se muestra la galaxia espiral NGC 5194, conocida como Galaxia del Remolino⁴, en la imagen se puede observar el objeto a distintas longitudes de onda: ultravioleta (UV), visible (óptico), cercano infrarrojo (NIR), mediano infrarrojo (MIR), lejano infrarrojo (FIR) y radio, obteniendo así mayor información, que permite conocer con más detalle este tipo de objetos celestes.



Fig. 3.3: Galaxia del Remolino NGC 5194 en diferentes longitudes de onda. Collage de imágenes, realizado con el programa GIMP (GNU Image Manipulation Program).

A continuación se hace la descripción de la figura 3.3 donde se muestra la información que se puede obtener en las respectivas frecuencias y las referencias de donde se han obtenido dichas imágenes.

- Ultravioleta (UV): Brazos espirales muy marcados, indica zonas de formación de estrellas jóvenes y de alta masa que dan lugar a las supernovas. Galaxy Evolution Explorer (*GALEX*). Jet Propulsion Laboratory NASA.
- Visible: Se observa el bulbo (parte superior de la galaxia) y los brazos espirales, indica estrellas de edad intermedia, se ve también las líneas de polvo. Cosmic Whirlpool Credit and Copyright, Tony and Daphne Hallas.
- Cercano Infrarrojo (NIR): Se observa el bulbo muy intenso, brazos espirales menos marcados, indica población más vieja de estrellas. Encuesta Two-Micron All-Sky Survey (2MASS). Universidad de Massachusetts, Estados Unidos.
- Mediano Infrarrojo (MIR): Se intensifican los brazos, muestra polvo calentado por las estrellas jóvenes. Infrared Space Observatory *ISO*, Agencia Espacial Europea (ESA) en colaboración con las agencias espaciales ISAS, integrada actualmente en la JAXA de Japón y la estadounidense NASA.

⁴También conocida como Objeto Messier 51 (M51) es una galaxia espiral, a unos 30 millones de años luz de distancia, que está en el proceso de fusión con una galaxia más pequeña, vista en su parte superior izquierda. Información de National Aeronautics and Space Administration, Page Last Updated, 2017.
- Lejano Infrarrojo (FIR): Indica polvo frío calentado por las estrellas de edad intermedia. Infrared Astronomical Satellite *IRAS*. Jet Propulsion Laboratory (JPL) NASA.
- Radio: Brazos y núcleo marcados, indica regiones de formación de estrellas y supernovas. Very Large Array VLA, uno de los principales observatorios radioastronómicos del mundo, Nuevo México.

Estudiar la galaxia donde nos encontramos situados es indudablemente uno de los aspectos más importantes que tienen los astrónomos en la actualidad, de manera que la Vía Láctea⁵ ha podido ser analizada y se han obtenido diferentes mapas según la longitud de onda. En la figura 3.4 se tiene un conjunto de imágenes que muestran nuestra Galaxia en múltiples bandas de longitud de onda, desde radio hasta rayos gamma.

Descripción de los mapas en las diferentes longitudes de onda de la Vía Láctea⁶ (desde la parte superior de la imagen 3.4, en orden descendente).

- Radio Continuo (408 MHz). Datos tomados con radiotelescopios terrestres (Jodrell Bank MkI y MkIA, Bonn 100 metros y Parkes 64 metros). La mayor parte de la emisión proviene de la dispersión de electrones libres en los plasmas interestelares. Algunas emisiones también provienen de electrones acelerados en fuertes campos magnéticos.
- Hidrógeno Atómico. Densidad de columna de hidrógeno atómico neutro a partir de estudios de radio de la transición de 21 cm de hidrógeno. La emisión de 21 cm traza el medio interestelar cálido, que a gran escala está organizado en nubes difusas de gas y polvo que tienen tamaños de hasta cientos de años luz. Los datos mostrados aquí son una combinación de varias imágenes, tomadas con telescopios terrestres en los hemisferios norte y sur.
- Hidrógeno Molecular. La densidad de columna del hidrógeno molecular (H_2) se deduce de la intensidad de la línea de monóxido de carbono (CO) H_2 . Este gas se concentra en los brazos espirales en nubes moleculares, que a menudo son sitios de formación estelar. Los datos que aquí se muestran son un conjunto de estudios realizados con telescopios de 1,2 m en la onda milimétrica, uno en la ciudad de Nueva York y el otro en Cerro Tololo en Chile.

⁵Es una galaxia espiral barrada es decir, una galaxia espiral, que tiene un gran abultamiento central de estrellas y unos brazos espirales formados por gas, polvo y estrellas en forma de disco. Desde la perspectiva desde la Tierra, se puede apreciar la galaxia esencialmente de canto. La Tierra está cerca del plano del disco, a unos 28.000 años luz del centro galáctico. Información de National Aeronautics and Space Administration, Page Last Updated, 2017.

⁶The Multiwavelength Milky Way, National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2010.

radio continuum (408 MHz) atomic hydrogen radio continuum (2.5 GHz) molecu infrared mid-infrared near infrared optical x-ray 0 Multiwavelength Milky Way NASA

Fig. 3.4: Multiwavelength Milky Way. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center. 2010

- Infrarrojo. Intensidad infrarroja media y lejana, tomadas por el satélite *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS). La mayor parte de la emisión es térmica, del polvo interestelar calentado por la absorción de luz, incluyendo las regiones formadoras de estrellas incrustadas en las nubes interestelares.
- Infrarrojo cercano. Intensidad del infrarrojo cercano compuesto, observado por el instrumento *Diffuse Infrared Background Experiment* (DIRBE), instrumento en el observatorio espacial *Cosmic Background Explorer* (COBE). La mayor parte de la emisión proviene de estrellas frías, de baja masa en el disco y protuberancia de la Vía Láctea.
- Óptico. La luz proviene principalmente de las estrellas a pocos miles de años luz del Sol, cerca de la escala de la Vía Láctea, que tiene un diámetro del orden de 100.000 años luz. La nebulosidad del gas caliente y de baja densidad está generalizada en la imagen. Los parches oscuros se deben a las nubes de polvo absorbentes, que son evidentes en los mapas de Hidrógeno Molecular e infrarrojos como regiones de emisión.
- Rayos X. Intensidad de rayos X, compuestas por un instrumento en el *Roentgen* Satellite (ROSAT) en tres bandas de rayos X. Las variaciones de color indican variaciones de la absorción o de las temperaturas de las regiones emisoras. El plano galáctico aparece azul porque sólo los rayos X de energía más alta pueden pasar a través de las densidades de columna grandes de gas.
- Rayos gamma. Intensidad de la emisión de rayos gamma de alta energía observada por *Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope* (EGRET), instrumento del Observatorio de Rayos Gamma *Compton Gamma-Ray Observatory* (CGRO). La mayoría de los rayos gamma se originan en colisiones de rayos cósmicos con núcleos en nubes interestelares, y por lo tanto la Vía Láctea es una fuente difusa de luz de rayos gamma.

3.2.2 Espectro Radioeléctrico

El rango de las ondas de radio se subdivide en varias bandas que se han clasificado de tal manera que se le conoce como el **espectro radioeléctrico**, como se observa en la tabla 3.1, este es un recurso de naturaleza muy escasa debido a la demanda de servicios de radiocomunicación e implica que la asignación de frecuencias sea un proceso complejo sujeto a una cuidadosa planificación. El espectro radioeléctrico se divide en bandas de frecuencias, las cuales se atribuyen a diferentes servicios radioeléctricos, estas bandas se adjuntan a servicios concretos reglamentados por la *Unión Internacional de Telecomunicaciones* (UIT) que es el organismo regulador a nivel mundial y después los países asignan las frecuencias a las diferentes modalidades y servicios.⁷

⁷Agencia Nacional del Espectro. *Espectro Radioeléctrico*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. 2017

Banda	Frecuencia	Longitud de Onda	nda Denominación	
VLf	3 kHz-30 kHz	100 km-10 km	Very Low Frecuency	
LF	30 kHz-300 kHz	10 km-1km	Low Frecuency	
MF	0.3 MHz-3 MHz	1000 m-100 m	Medium Frecuency	
HF	3 MHz-30 MHz	100 m-10 m	High Frecuency	
VHF	30 MHz-300MHz	10 m-1 m	Very High Frecuency	
UHF	0.3 GHz-3 GHz	100 cm-10 cm	Ultra High Frecuency	
SHF	3 GHz-30 GHz	10 cm- 1cm	Super High Frecuency	
EHF	30 GHz-300 GHz	10 mm- 1 mm	Extremely High Frecuency	

Tabla 3.1: Bandas del espectro radioeléctrico.

El uso de las diferentes bandas de frecuencia se hace dependiendo del campo en el que se esté trabajando y se adjudican a servicios concretos reglamentados por la UIT. En la figura 3.5 se indican algunos de los usos más comunes para cada banda de frecuencia del espectro radioeléctrico.



Fig. 3.5: Bandas del espectro radioeléctrico, según su uso más frecuente. *Encyclopedia Britannica, Inc. Todos los derechos reservados.* 2013

El radiotelescopio diseñado en este trabajo opera en la banda Super High Frecuency (SHF) o simplemente super alta frecuencia, que comprende el rango de 3 a los 30 GHz y que hace parte de una porción del espectro electromagnético en el rango de las microondas. El instrumento está diseñado para trabajar específicamente en el rango de frecuencias que comprende desde los 12 a los 18 GHz, a esta banda se le conoce con el nombre de **banda Ku** por sus siglas en inglés «Kurz **u**nten **b**and». La banda Ku se usa principalmente en las comunicaciones satelitales siendo la televisión uno de sus principales usos, además para el estudio de radioemisiones detectando objetos

como el Sol, la Luna, remanentes de supernova o nebulosas como la Nebulosa de Orión. Esta banda se divide en diferentes segmentos que cambian por regiones geográficas de acuerdo a la UIT.

A continuación, en la figura 3.6 se muestra un diagrama que ilustra la intensidad de fuentes de radiación como función de la frecuencia. La línea gris marca el rango de frecuencia que se puede detectar en la banda Ku.



Fig. 3.6: Intensidad de fuentes de radiación como función de la frecuencia, la línea gris indica lo que detecta la banda Ku. Imagen tomada de Manual de Construcción de un Radiotelescopio en la Banda de 12GHz para Usos Docentes - INAOE.

3.3 Emisión de Radio en Astrofísica

Existen diferentes mecanismos de emisión electromagnética, que se pueden clasificar entre aquellos que producen una emisión en el continuo y los que producen emisión de líneas. Dentro de estos dos tipos, se puede hacer una diferenciación entre los que son producidos por efectos de la temperatura llamados **mecanismos térmicos** y aquellos en los que la temperatura no desempeña un papel fundamental llamados **mecanismos no térmicos**.

A causa de los movimientos aleatorios de los electrones, todos los cuerpos emiten radiaciones térmicas o calor, características de su temperatura. Se han utilizado mediciones cuidadosas en todo el espectro de la intensidad de emisiones para calcular la temperatura de los cuerpos celestes lejanos, así como de los planetas del Sistema Solar y las nubes cálidas de gas ionizado de toda nuestra Galaxia. Sin embargo, las mediciones de la radioastronomía se ocupan con frecuencia de las emisiones no térmicas mucho más intensas originadas por partículas cargadas como los electrones y los positrones que se mueven a través de los campos magnéticos galácticos e intergalácticos.

La emisión en radio se puede presentar en dos formas: **radio continuo** que es la forma global del espectro o distribución general de la intensidad de radiación electromagnética en función de la longitud de onda y **líneas espectrales** en ciertas regiones poco extensas del espectro electromagnético, el continuo se interrumpe y vuelve a recuperarse. Existen dos tipos de líneas espectrales; si la línea muestra una disminución de la intensidad con respecto al continuo se denomina *línea de absorción*, en caso contrario, si corresponde a un incremento de la intensidad se conoce como *línea de emisión*. En el radio continuo la emisión se extiende en una región ancha del espectro electromagnético mientras que las líneas espectrales se hallan centradas en una frecuencia específica. Estas formas dependen del origen físico de la radiación.[16]

3.4 Radio Continuo

La emisión de radio continuo, depende de los mecanismos físicos de como se da dicha radiación, se clasifica en tres mecanismos: *emisión térmica, radiación de frenado,* y *radiación sincrotrón*.

3.4.1 Emisión Térmica

Todo cuerpo, por el hecho de estar a una cierta temperatura superior al cero absoluto emite energía electromagnética denominada radiación térmica, generada por el movimiento acelerado que sufren las partículas cargadas que constituyen el cuerpo. Es el caso de la radiación térmica del Sol. Uno de los mecanismos térmicos más importantes es el conocido como **radiación del cuerpo negro**. Un cuerpo negro ideal absorbe toda la energía electromagnética que recibe y por estar en equilibrio térmico, reemite toda la energía absorbida. Esta emisión depende exclusivamente de la temperatura del cuerpo.

La intensidad de la radiación emitida o radiancia espectral de un cuerpo negro en equilibrio termodinámico $I(\nu, T)$, con una cierta temperatura T y frecuencia ν , viene dada por la *ley de Planck*:[13][6]

$$I(\nu,T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$
(3.1)

donde

 $h = 6,63 \times 10^{-34} Js$, es la constante de Planck. $k = 1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$, es la constante de Boltzmann. $c = 3 \times 10^8 ms^{-1}$, es la velocidad de la luz.

La ecuación 3.1 da la potencia por unidad de frecuencia. En función de la longitud de onda $I(\lambda, T)$ se puede deducir fácilmente considerando que:

$$I(\lambda, T)d\lambda = -I(\nu, T)d\nu.$$

Como la relación entre la longitud de onda λ y la frecuencia ν está dada por:

$$c = \lambda \nu$$
,

entonces

$$d\nu = -c/\lambda^2 d\lambda,$$

y se obtiene la siguiente ecuación:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.$$
(3.2)

Al integrar las ecuaciones 3.1 y 3.2 sobre ν y λ respectivamente, se obtiene el brillo o la intensidad total de radiación de un cuerpo negro.

$$I(T) = \frac{2h}{c^2} \int_0^\infty \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu,$$
(3.3)

haciendo

$$\times = \frac{h\nu}{kT},\tag{3.4}$$

se obtiene

$$I(T) = \frac{2h}{c^2} \left[\frac{kT}{h}\right]^4 \int_0^\infty \frac{\times^3}{e^\times - 1} d\times, \qquad (3.5)$$

donde la integral tiene el valor de $\frac{\pi^4}{15}$ y sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene finalmente.

$$I(T) = \frac{2\pi^4 k^4}{15c^2 h^3} T^4, aga{3.6}$$

las constantes se pueden definir como σ , así:

$$\sigma = \frac{2\pi^4 k^4}{15c^2 h^3} = 1.8047 \times 10^{-5} \ erg \ cm^{-2}s^{-1}K^{-4},$$

por tanto la ecuación 3.6 queda expresada:

$$I(T) = \sigma \ T^4. \tag{3.7}$$

La ecuación 3.7 se conoce como la *ley de radiación de Stefan-Boltzmann*, que fue encontrada experimentalmente en 1879 por J. Stefan y derivada teóricamente en 1884 por L. Boltzmann antes de que la ley de radiación de Planck fuera conocida.

La ley física que relaciona la longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión de radiación de cuerpo negro y la temperatura de dicho cuerpo, se conoce como *Ley de desplazamiento de Wien*, su deducción puede hacerse a partir de la ecuación 3.1 encontrando el máximo de la función, matemáticamente esta ley está dada por:

$$\lambda_{max} = \frac{A}{T},\tag{3.8}$$

donde T es la temperatura del cuerpo negro en kelvin, λ_{max} es la longitud de onda del máximo de emisión en metros y $A = 0.0028976 \, mK$ se denomina constante de Wien.

Cuando se tiene que la ecuación 3.4 está lejos del valor máximo, la ecuación 3.1 puede ser aproximada por una ecuación más simple, haciendo:

$$h\nu \ll kT. \tag{3.9}$$

Expandiendo la expresión $e^{hc/k\lambda T} \cong 1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots$ y sustituyendo en 3.1, se obtiene la expresión:

$$I(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT,$$
(3.10)

se ha llegado a la ecuación 3.10, que se conoce como la *ley de Rayleigh-Jeans*, que describe la relación lineal entre la intensidad de radiación y la temperatura. Implica

que el brillo y la temperatura termodinámica del cuerpo negro que emite la radiación, es estrictamente proporcional. Esta características es muy útil porque es la forma en que se mide en radioastronomía el brillo de una fuente extendida⁸ por su temperatura de brillo. [13]

El interior de una estrella se comporta, a efectos de radiación, como si fuera un cuerpo negro. Por este motivo, siguiendo la ley de Wien, estrellas con mayor temperatura tendrán máximos de emisión más energéticos (menor longitud de onda) y estrellas más frías tendrán su máximo en regiones menos energéticas (mayor longitud de onda) del espectro. Por tanto, si el máximo de la radiación depende únicamente de la temperatura del cuerpo, los objetos celestes, dependiendo de su temperatura, emitirán fundamentalmente en unas u otras regiones del espectro electromagnético.[16]

La figura 3.7 muestra las curvas de radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas y su relación con el rango visible. La curva con T = 5772 K corresponde a la temperatura de la fotósfera del Sol y se puede observar que el máximo de emisión se encuentra en la región del verde, comprendida entre los 495 a 570 nanómetros.



Fig. 3.7: Curvas de radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas. Imagen fuente de esta investigación.

⁸Fuente de tamaño angular mayor que la resolución del instrumento empleado para observarlo.

3.4.2 Radiación de Frenado

También denominada *Bremsstrahlung*, se produce por la desaceleración de una partícula cargada, como por ejemplo un electrón, cuando es desviado por otra partícula cargada, como un núcleo atómico. Si el electrón se acerca a un átomo ionizado, es decir, cargado eléctricamente, se produce una interacción eléctrica entre ambos, que provoca un cambio en la trayectoria o velocidad del electrón. Esta variación tiene como consecuencia la emisión de la radiación, la cual es continua, ya que estas variaciones de trayectoria o velocidad no tienen unos valores determinados, por lo que los fotones emitidos barren un amplio rango del espectro.

La intensidad y frecuencia de esta radiación depende de la agitación térmica a la que estén sometidos los átomos y los electrones del gas, por lo que se trata también de una radiación térmica, las fuentes de emisión pueden ser el gas ionizado que se encuentran cerca de las regiones de formación estelar o núcleos galácticos activos, alrededor de las estrellas, en las nebulosas, en los cúmulos estelares o incluso en planetas como Júpiter las interacciones entre ellas pueden producir emisión continua en el rango de las radiofrecuencias.⁹

3.4.3 Emisión Sincrotrón

Radiación no térmica que depende de la interacción de las partículas cargadas con los campos magnéticos. Cuando una partícula cargada entra en un campo magnético experimenta una fuerza que la obliga a trazar círculos o espirales alrededor de las líneas de campo. Por lo tanto, la partícula sufre una aceleración angular que induce la emisión de radiación.

En condiciones no relativistas, esta radiación, es denominada *ciclotrón* y no es suficientemente intensa como para ser relevante en los diferentes escenarios astrofísicos. Sin embargo, cuando la velocidad de las partículas cargadas se aproxima a la velocidad de la luz, éstas emiten un tipo particular de emisión mucho más intensa denominada sincrotrón, esta radiación emite gran cantidad de energía y su frecuencia depende del campo magnético y de la velocidad de la partícula, pudiendo tomar un rango continuo de valores.

La emisión sincrotrón se produce artificialmente en los anillos de almacenamiento de un $sincrotrón^{10}$ y en la naturaleza se produce por los electrones a muy altas velocidades moviéndose a través de los campos magnéticos del espacio y se observa en las explosiones y en remanentes de supernovas, radiogalaxias, y púlsares.¹¹

⁹HAUG, Eberhard y NAKEL, Werner. *The Elementary Process of Bremsstrahlung.* World Scientific. 2004.

¹⁰Es un tipo de acelerador de partículas. Se diferencia de otros aceleradores en que las partículas se mantienen en una órbita cerrada.

¹¹WIEDEMANN, Helmut. Synchrotron Radiation.Springer Science & Business Media. 2013.

3.5 Líneas Espectrales

Los electrones en un átomo se encuentran ligados al núcleo con cierta energía la cual está determinada por el nivel energético en el que se encuentran. Los niveles energéticos están bien definidos para cada especie atómica (elemento) y los electrones únicamente pueden encontrarse en dichos niveles que de acuerdo a la teoría cuántica, deben ser discretos, su energía está cuantizada. El nivel de energía más bajo se denomina estado fundamental; si el electrón se encuentra en un nivel mas alto, decimos que ocupa un estado excitado y el átomo está excitado.

Posterior a la absorción de un fotón, los electrones excitados tenderán a establecerse en niveles de menor energía, como lo explica más claramente J. Fabregat:

Los átomos excitados son inestables, ya que la naturaleza siempre tiende a los estados de menor energía. El electrón que se encuentra en un estado de energía alto, espontáneamente desciende a ocupar uno de energía menor. Cuando se produce esta transición, el átomo emite un fotón, cuya longitud de onda es la correspondiente a la diferencia de energías entre los estados inicial y final.¹²

En el rango de radio del espectro electromagnético se suelen encontrar líneas de transición, rotacionales y vibracionales de los átomos y moléculas más comunes en el Universo. Estas líneas suelen observarse en emisión pero también pueden observarse en absorción sobre un fondo de radio continuo. La línea de emisión de gran interés para los astrónomos es la *línea del átomo de hidrógeno neutro de 21 cm*.

3.5.1 Línea de Hidrógeno Neutro de 21 cm

La transición de la línea de 21 cm, denominada también como *línea de HI* se debe a un desdoblamiento hiperfino del estado fundamental del átomo de hidrógeno, debido al acoplamiento de los espines del protón y el electrón.

El mecanismo de formación de esta línea, de forma simplificada, se expone a continuación: en el caso de los átomos neutros de hidrógeno, es decir, átomos no ionizados, el nivel más bajo de energía viene dado por la situación en que los espines del electrón y del protón son antiparalelos, es decir, tienen sentidos opuestos. Si el átomo de hidrógeno adquiere una leve cantidad de energía al colisionar con otro átomo o electrón, los espines del electrón y del protón pueden alinearse de forma que el átomo queda en un estado excitado. Si el átomo retorna entonces al nivel fundamental de menor energía lo hace emitiendo un fotón cuya frecuencia es conocida con notable precisión, en la figura 3.8 se muestra una representación gráfica de dicha transición.

¹²FABREGAT, Juan. La formación de los espectros en: Módulo V: Técnicas observacionales, Astronomía óptica e infrarroja. Valencian International University. 2012. p. 21.

La frecuencia del fotón emitido es $\nu=1420405751.786\pm0.001$ Hz, es decir aproximadamente de 1.4 GHz que corresponde a una longitud de onda aproximada de 21 cm.¹³



Fig. 3.8: Mecanismo de emisión de la línea espectral de 21 cm del Hidrógeno neutro. Imagen fuente de esta investigación.

El hidrógeno es el elemento más abundante del Universo y gracias a la observación de esta radicación se pudo determinar, entre otras cosas, la estructura espiral de nuestra Galaxia, así como el movimiento de rotación de la misma alrededor de su centro. Las observaciones del *HI* han permitido también la determinación de la morfología y movimiento de rotación de otras galaxias.

3.6 Radio Emisiones Solares

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra, por su proximidad, es un recurso extraordinario para el estudio de los fenómenos estelares y de vital importancia ya que su energía, sustenta a casi todas las formas de vida y determina el clima de nuestro planeta. Bajo ciertas condiciones de presión, densidad y temperatura radía ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda, debido a que en su interior se producen una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa que se transforma en energía.

La curva de densidad de radiación del Sol se ajusta a un **cuerpo negro**, el cual emite energía siguiendo la **ley de Planck** (Ecuación 3.1) a una temperatura de 5772 K, donde su máximo se encuentra en las longitudes de onda correspondientes a la región visible, como se explicó en la sección anterior y se puede observar la figura 3.7.

¹³ Emisiones de Líneas espectrales de átomos y moléculas. Madrid Deep Space Communications Complex (MDSCC). Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. 2017.

En el rango óptico, los espectros de los planetas son constituidos por la luz del Sol reflejada sobre éstos con algunas características de absorción propias del planeta, mientras que en el caso de las estrellas, el espectro es formado casi por la totalidad de la radiación proveniente de una zona llamada **fotósfera**: *es una zona de transición donde la materia de la estrella pasa del estado de plasma al estado gaseoso*.

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

La radiación que nos interesa estudiar se encuentra en la banda de las microondas y es de origen sincrotrónico, su emisión se produce en una capa especial del Sol, llamada **cromósfera**: su nombre literalmente significa esfera de color, se llama así debido a que es de un color rojizo, en contraste con la corona que es prácticamente blanca y su color es debido a que su máximo de emisión se produce en $H\alpha(línea alfa del hidrógeno)$ a una longitud de onda de 656 nm. La cromósfera se extiende por encima de la superficie visible del Sol, o Fotósfera y está limitada superiormente por la atmósfera solar o Corona.

La observación en radio de la cromósfera debe realizarse, en un ancho de banda de 2 a 20 GHz.¹⁴ En la figura 3.9 se puede observar la estructura básica del Sol.



Fig. 3.9: Estructura del Sol. Dominio público, Wikimedia Commons

¹⁴G.B. Gelfreikh. *Physics of the Solar Active Regions from Radio Observations*. Astronomical Observatory of RAS, St Petersburg, Russia. 2002.

3.7 Conceptos de Radioastronomía

Hasta ahora, se ha abarcado el estudio de la radiación y su comportamiento, por lo tanto en esta sección se estudiará los fundamentos de como medir dicha radiación, exponiendo los conceptos más importantes de la radioastronomía. Es evidente que en el cielo hay fuentes que emiten ondas de radio de forma más potente que otras, por ello se cuantifica mediante las magnitudes físicas y las unidades de medida adecuadas.

3.7.1 Intensidad

El campo de radiación queda descrito por la intensidad de radiación, llamada también *intensidad específica* por tratarse de energía por unidad de intervalo de frecuencia. Se le conoce como brillo normalmente cuando nos referimos a la intensidad específica recibida de una fuente.

La intensidad $i_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$ es función de la posición \mathbf{r} , de la dirección dada por el vector unitario \mathbf{k} y del tiempo t. Se define como la energía por unidad de tiempo que atraviesa un área unidad perpendicular a la dirección \mathbf{k} , centrada en la posición \mathbf{r} , transportada por la radiación que se propaga dentro de un ángulo sólido unidad centrado en la dirección \mathbf{k} , en una unidad de intervalo de frecuencia.

$$dE = i_{\nu} dt dA \cos\theta d\Omega d\nu \quad erg \ s^{-1} cm^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}. \tag{3.11}$$

Como la intensidad es un flujo de energía por unidad de ángulo sólido, su magnitud no varía con la distancia a la fuente.



Fig. 3.10: Energía dentro de un ángulo sólido $d\Omega$ que atraviesa una área dA cuya normal n forma un ángulo θ con la dirección considerada **k**. Imagen fuente de esta investigación.

3.7.2 Densidad de flujo

La densidad de flujo o simplemente flujo S_{ν} , es el flujo de energía que atraviesa el área unidad por unidad de intervalo de frecuencia. Por lo tanto, es la **intensidad integrada** para todas las direcciones, teniendo en cuenta el factor de proyección del área perpendicularmente a la dirección considerada.

$$S_{\nu} = \int_{4\pi} i_{\nu} \cos\theta d\Omega. \tag{3.12}$$

Para efectos prácticos, al calcular la densidad de flujo de una fuente discreta, el dominio de integración es mucho menor de $4\pi sr$ y se puede prescindir del factor $\cos\theta$ y la ecuación queda expresada simplemente:

$$S_{\nu} = \int_{fuente} i_{\nu} d\Omega. \tag{3.13}$$

Las dimensiones de la densidad de flujo son $erg \ s^{-1}cm^{-2}Hz^{-1}$. La unidad práctica es el **Jansky** (Jy) que se define:

$$1Jy = 10^{-23} erg \ s^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}$$

Otras magnitudes físicas que se pueden derivar de la densidad de flujo son: la **luminosidad específica** a la frecuencia ν de una fuente isótropa situada a distancia d del observador, se obtiene integrando su densidad de flujo para una superficie esférica de radio d.

$$L_{\nu} = 4\pi d^2 S_{\nu} \quad ergs^{-1} \text{Hz}^{-1}. \tag{3.14}$$

La luminosidad bolométrica de una fuente es la integral, para todas las frecuencias, de su luminosidad específica. Es la energía total radiada por la fuente por unidad de tiempo y sus dimensiones son $erg \ s^{-1}$. La unidad más usada, es la luminosidad solar L_{\odot} .

$$L_{\odot} = 3.826 \times 10^{-33} \ ergs^{-1}$$
.

3.7.3 Temperatura de Brillo

En equilibrio termodinámico, la radiación está en equilibrio con la materia y su intensidad viene dada por la *ley de Planck* para un cuerpo negro, ecuación 3.1. En general, la radiación no está en equilibrio con la materia y por lo tanto, la intensidad i_{ν} no viene dada por una función de Planck. Sin embargo, a cada frecuencia ν podemos definir una temperatura, la **temperatura de brillo** T_B , tal que la intensidad a esta frecuencia tenga el valor de la curva de Planck a temperatura T_B .

$$i_{\nu} = I_{\nu}(T_B).$$
 (3.15)

[15][3][8]

Capítulo 4

¿Qué es un Radiotelescopio?

En el contenido de este capítulo, se abarca de manera más completa los conceptos acerca del funcionamiento del dispositivo que permite realizar radioastronomía, el **radiotelescopio**. Se da una explicación detallada de las partes que lo conforman y de las magnitudes físicas que permiten entender matemáticamente el comportamiento de este instrumento. En los capítulos anteriores se han dado algunas definiciones, que ayudarán a entender el desarrollo de esta sección.

Un radiotelescopio es el dispositivo utilizado para el estudio de las emisiones de radiación electromagnética de los cuerpos celestes, en el rango de las radiofrecuencias. Como se ha mencionado anteriormente, la importancia de la radioastronomía, es que muchos de los objetos en el Universo emiten radiación que puede ser detectada en mayor medida en la región de radio del espectro y que no se podrían estudiar en otras longitudes de onda como en el rango de luz visible.

La sensibilidad del radiotelescopio, es decir, la habilidad para detectar débiles fuentes de radio depende del área, la eficiencia de la antena, de la sensibilidad del receptor empleado para amplificar y detectar la señal, y de la duración de la observación. La finalidad de un radiotelescopio es el captar la radiación emitida por un objeto, la cual llega en diferentes longitudes de onda de este rango del espectro, para ello, el sistema receptor se adecua para trabajar con la frecuencia de interés, es decir, nosotros sintonizamos los receptores a la frecuencia que deseamos estudiar.[4]

4.1 Estructura de un Radiotelescopio

La estructura de un radiotelescopio se compone básicamente de dos partes principales: una antena, también llamada superficie colectora, las más comunes están formadas por un disco metálico de forma de antena parabólica, o por una simple antena en forma de dipolo, y un receptor de radio, que son una serie de instrumentos que amplifican la señal y la almacenan para su posterior análisis. La antena de un radiotelescopio, está constituida principalmente por una superficie colectora, generalmente suele tener forma de paraboloide de revolución, que actúa como un espejo de forma que las ondas de radio que le llegan se reflejan y son enviadas hacia un punto denominado *foco*. Posteriormente estas ondas son filtradas y amplificadas hasta que finalmente llegan a un ordenador, donde se puede proceder al tratamiento de los datos recogidos. El esquema básico de un radiotelescopio se muestra en la figura 4.1, en donde cada parte se compone de diferentes elementos, que juegan un papel importante para su funcionamiento y que se describen detalladamente más adelante.[7]



Fig. 4.1: Esquema partes principales de un radiotelescopio. Imagen fuente de esta investigación.

4.2 Antena

El primer elemento fundamental para el funcionamiento de un radiotelescopio, es la antena, que es la encargada de captar las ondas electromagnéticas de radio. Las propiedades de las antenas son analizadas de acuerdo a las leyes básicas de la física, según el *Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos* (IEEE), la antena se define como un dispositivo que forma parte de un sistema transmisor (Tx) o un receptor (Rx) diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (OEM), el hecho que pueda funcionar como receptor y emisor, se conoce como el *principio de reciprocidad*. La principal finalidad de la antena de un radiotelescopio es captar la máxima radiación de la fuente observada a la frecuencia a la que el radiotelescopio se encuentra sintonizado.¹

¹REVISTA Colombiana de Física. SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA OBTENCIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS DE BOCINA. VOL.38, No.4. 2006.

Las antenas emisoras lanzan ondas al medio exterior, la corriente circula debido al generador o emisor que tienen conectado y fluye a través de una línea de transmisión² o guía de onda³ hasta llegar a la antena. La antena convierte la corriente eléctrica en ondas electromagnéticas que se pueden transmitir por el espacio libre como se observa en el esquema A de la Figura 4.2.

Para el caso de las antenas receptoras, *convierten las ondas electromagnéticas* provenientes del espacio exterior a corrientes eléctricas, que son guiadas a través de una línea de transmisión hasta llegar al receptor como se observa en el esquema B de la Figura 4.2.

Así, una antena convierte corrientes eléctricas a ondas electromagnéticas en el espacio libre y viceversa.[15]



Fig. 4.2: La figura (A) muestra una antena emisora, ensamblada a un generador permite la emisión de ondas. La Figura (B) muestra una antena receptora que conectada al receptor captan las ondas emitidas por una fuente lejana. Imagen fuente de esta investigación.

4.2.1 Tipos de antenas

Existen una gran variedad de tipos de antenas, que depende de la aplicación para la cual se usan, sin embargo todas siguen el mismo principio básico y se caracterizan por ser una región de transición de onda guiada a una onda radiada al espacio libre o viceversa. A continuación se da una descripción breve de algunos tipos de antenas.⁴

- Antenas de alambre. Son las más comunes, se caracterizan por estar construidas con hilos conductores. Pueden estar formados por hilos rectos (dipolo), anillos (circular, cuadradas o de otra forma) y hélices.
- Antenas de apertura. En la mayoría de los casos son secciones abiertas de una guía de onda; en otros casos pueden estar constituidas por extremos uniformes

 $^{^{2}}$ Es cualquier sistema de conductores, semiconductores, o la combinación de ambos, que puede emplearse para transmitir información, en la forma de energía eléctrica o electromagnética entre dos puntos.

 $^{^{3}}$ Una guía de onda es un tubo conductor a través del cual se transmite la energía en la forma de ondas electromagnéticas.

⁴BALANIS, C. Antenna Theory, Analysis and Design, 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc. 1997.

de guías de onda. Las antenas de apertura son utilizadas en radioastronomía o también para alimentar otro tipo de antenas. Las antenas de apertura son de tipo corneta piramidal, corneta cónica y aperturas rectangulares, entre otras.

- Antenas Reflectoras. Se basan en el trazado de rayos, actúan como un espejo, donde las señales que rebotan en la antena son concentradas en el punto focal del reflector, en el foco se encuentra un alimentador encargado de recibir la señal. Algunas configuraciones para antenas reflectoras son: esquinas, parabólicas, esféricas, Cassegrain (caracterizado por dos reflectores, uno cóncavo y otro convexo).
- Arreglos de antenas. Muchas veces una sola antena no es suficiente para obtener buenos resultados, sin embargo por falta de sensitividad o resolución angular es necesario acoplar varias antenas, a lo que comúnmente se conoce como *interferómetros* para obtener el rendimiento equivalente al de una gran antena.

A continuación se clasifican los tipos de antena de acuerdo al modo en que emiten o recepcionan la radiación electromagnética.

- Antena Isotrópica: Es una antena ficticia, no realizable físicamente, que radia con la misma intensidad en todas las direcciones del espacio. Aunque no existe ninguna antena con esas características, es muy utilizada como antena de referencia.
- Antena Direccional: Es una antena que concentra la mayor parte de su radiación en una dirección particular. Ejemplos de estas antenas son las cornetas (Horn), los reflectores.
- Antena Omnidireccional: Es una antena que radia uniformemente en un plano, ejemplos de estas antenas son los monopolos y dipolos.

4.3 Introducción a la Teoría de Antenas

Independientemente del tipo de antena usada en radioastronomía, es conveniente definir algunos parámetros que especifican las propiedades de las antenas, para ello en esta sección se describen los conceptos más relevantes y básicos sobre la teoría de antenas, exponiendo las características de sus parámetros de medición, que permiten entender su funcionamiento.

Se requieren características especiales de la antena para determinar la dirección de emisión de una señal, algunos parámetros básicos que son esenciales para la selección y el diseño de una antena se indican a continuación.

4.3.1 Temperatura de Antena

Si se conecta un resistor R a la entrada de un amplificador lineal, el movimiento térmico de los electrones en el resistor producirá una corriente i(t) que forma una entrada aleatoria al amplificador. En equilibrio térmico, esta potencia es determinada por la temperatura física, a esta entrada aleatoria se le conoce como ruido Johnson – $Nyquist^5$, el fenómeno fue medido por primera vez por John B. Johnson en 1928 en los laboratorios Bell, y fue estudiado por Harry Nyquist, quien elaboró la explicación técnica del fenómeno.

En radioastronomía normalmente se determina la potencia recibida por una antena en términos de temperatura y se hace con el *teorema de Nyquist* 4.2. Si consideremos una resistencia R a temperatura T. Debido al movimiento de los electrones en la resistencia aparecerá un voltaje V en los extremos de la misma, que varía con el tiempo de forma aleatoria y su valor promedio sobre un intervalo grande de tiempo es igual a cero, pero el voltaje cuadrático medio no es igual a cero ya que se trata de una potencia. Así, si aumentamos la temperatura en la resistencia la actividad de los electrones que circulan aumenta y por consiguiente el voltaje cuadrático medio también aumentará. De lo anterior se llega a la siguiente ecuación.

$$\bar{V}^2 = 4kBTR,\tag{4.1}$$

donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, B es el ancho de banda de frecuencias que pueden pasar a través de la resistencia y R es el valor de la resistencia. La ecuación 4.1 es llamada ecuación de Nyquist y muestra claramente que el voltaje cuadrático medio \bar{V}^2 depende de la temperatura de la resistencia. De la ecuación de Nyquist vemos que la potencia que entrega en sus extremos una resistencia R está dada por:

$$P = \frac{\bar{V}^2}{R} = 4kBT. \tag{4.2}$$

En la ecuación 4.2 se observa que la potencia es directamente proporcional a la temperatura de la resistencia y se conoce precisamente como el *teorema de Nyquist*.

Si P es la potencia que una antena entrega en sus terminales mientras observa un objeto dado, entonces la temperatura de antena correspondiente está dada por la ecuación 4.3

$$T = \frac{P}{4kB}.\tag{4.3}$$

⁵Ruido térmico, que se genera por la agitación térmica de los portadores de carga, generalmente electrones dentro de un conductor en equilibrio, lo que sucede de manera independiente al voltaje aplicado

4.3.2 Patrón de Antena

La sensitividad de una antena para captar ondas electromagnéticas en general es una función de la dirección. Esta función se llama el patrón de antena, que representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia como función de la posición angular en relación con una antena. Se define como una función matemática que representa gráficamente las propiedades de radiación de la antena en función de las distintas direcciones del espacio a una distancia fija, normalmente en el campo lejano, que puede ser representada en forma volumétrica o de forma bidimensional.

Dicho diagrama suele representar la densidad de potencia radiada, o bien la amplitud o fase del campo eléctrico radiado por la antena. En algunos casos, no es necesario obtener el patrón de radiación tridimensional; es suficiente representar algunos cortes del diagrama, es decir, cortes bidimensionales, los cuales se pueden representar en coordenadas polares, donde el ángulo representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada.

Gracias al principio de reciprocidad se puede argumentar que el *patrón de radiación* de una antena transmisora es equivalente al diagrama de radiación de la misma antena pero actuando como receptora, en este caso el diagrama de radiación representa la sensibilidad que tiene la antena para recibir señales electromagnéticas en una cierta dirección.

Del patrón de radiación se pueden obtener la dirección de máxima radiación de la antena, lo que se conoce como **lóbulo principal**, otras direcciones de alta radiación **lóbulos secundarios** y las direcciones donde la radiación es nula llamadas **nulos**. En la Figura 4.3 se muestra un patrón de radiación de una antena direccional donde se puede observar que tiene un lóbulo principal, es decir radiación máxima, en la dirección z y con lóbulos menores (lóbulos laterales y lóbulos traseros) de menor radiación.

Generalmente se usa el patrón de potencia normalizado P_n , el cual está expresado en términos del vector de **Poynting** $S(\theta, \phi)$ que es la potencia por unidad de área⁶ y está dado por la siguiente ecuación:

$$P_n(\theta, \phi) = \frac{S(\theta, \phi)}{S(\theta, \phi)_{max}}.$$
(4.4)



Fig. 4.3: La figura (A) muestra el patrón de radiación de una antena direccional en 3 dimensiones. La mayoría de la radiación está contenida en el lóbulo principal acompañado también por radiación en los lóbulos menores. Entre los lóbulos están los ceros donde el campo es nulo. La figura (B) indica el mismo patrón en 2 dimensiones. KRAUS, John. ANTENNAS.

 P_n está normalizado de forma que su máximo, en la dirección del eje del radiotelescopio, es la unidad. Si consideramos un sistema de coordenadas angulares ligado al instrumento y centrado en la dirección de su eje, será $P_n(0,0) = 1$.

Existen varios parámetros importantes del patrón de radiación que ayudan a caracterizar un radiotelescopio, como la resolución angular del instrumento mediante el «ancho del haz a potencia media» HPBW (Half Power Beam Width) o FWHM(Full Width to Half Maximum), es decir el ángulo entre los puntos del haz principal donde la intensidad ha disminuido a la mitad del máximo.

Cuando la función que se está analizando es considerada como una distribución normal de la forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{((x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right],$$
(4.5)

donde σ es la desviación típica y x_0 puede ser cualquier valor (el ancho de la función no cambia con una traslación), la relación entre FWHM y la desviación típica está dada por la ecuación 4.6.⁷

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \ \sigma \approx 2.35482\sigma. \tag{4.6}$$

También se tiene el **BWFN** (*Beam Width First Nulls*), que es el ancho del haz entre los primeros nulos, del cual se ve la separación entre los primeros ceros. El BWFN es aproximadamente igual a la mitad del FWHM.

$$\frac{BWFN}{2} \approx FWHM, \tag{4.7}$$

Estos parámetros se pueden ver en la figura 4.4.

Si la respuesta de la antena fuera la misma hacia cualquier dirección tendríamos una antena isotrópica, la cual es una antena hipotética ya que en las antenas reales esto no sucede, pero suele ser un concepto útil para el análisis de antenas.



Fig. 4.4: Patrón normalizado de potencia en coordenadas polares con $P_n = 1$ a $\theta = 0$, donde $P_n = 0.5$ corresponde a la mitad de la potencia máxima. Imagen fuente de esta investigación.

⁷WOLFRAM, Math World. *Gaussian Function*. Free Wolfram research built with mathematica technology. 2017.

Patrón de radiación de aperturas circulares grandes con iluminación uniforme

La radiación de un paraboloide grande cuya apertura está uniformemente iluminada es equivalente a la de una apertura circular del mismo diámetro localizada en una placa perfectamente conductora de dimensiones infinitas sobre la que incide una onda plana uniforme. En este caso el patrón normalizado de intensidad de campo puede calcularse con el principio de Huygens de manera similar a una apertura rectangular y está dado por:⁸

$$E(\phi) = \frac{2\lambda}{\pi D} \frac{J_1\left[\frac{\pi D}{\lambda}\sin\phi\right]}{\sin\phi},\tag{4.8}$$

donde

D = diámetro de apertura (m).

 $\lambda =$ longitud de onda en el espacio libre (m).

 ϕ = ángulo respecto al eje normal a la apertura, medido a partir del centro de ésta.

 J_1 = Función de Bessel de primer orden.

El ángulo ϕ_0 al que ocurren los primeros nulos del patrón de radiación, se da cuando $J_1(\times) = 0$, es decir para un valor de $\times = 3.83$ y está dado por la siguiente relación:

$$\frac{\pi D}{\lambda}\sin\phi_0 = 3.83,\tag{4.9}$$

así

$$\phi_0 = \arcsin \frac{3.83\lambda}{\pi D} = \arcsin \frac{1.22\lambda}{D}.$$
(4.10)

Cuando el ángulo entre nulos es muy pequeño como es el caso de aperturas grandes, pueden aplicarse las siguientes relaciones:

$$\phi_0 \approx \frac{1.22}{D_\lambda} \quad (rad) = \frac{70^\circ}{D_\lambda},\tag{4.11}$$

donde $D_{\lambda} = D/\lambda =$ diámetro de apertura en función de la longitud de onda. En este caso el *ancho del haz entre los primeros nulos* es el doble de 4.11.

El ángulo entre los primeros nulos de una apertura circular grande iluminada uniformemente está dado por el **BWFN**:

$$BWFN = \frac{140}{D_{\lambda}} \quad (grad). \tag{4.12}$$

⁸KRAUS, John. ANTENNAS. MCGraw Hill . 1997.

El ancho del haz a potencia media **FWHM** (-3dB) para una apertura circular está dado por:

$$FWHM = \frac{58}{D_{\lambda}} \quad (grad). \tag{4.13}$$

4.3.3 Resolución Angular

Desde el punto de vista óptico, se dice que las imágenes de dos objetos superpuestos parcialmente se pueden resolver, cuando los dos objetos son distinguibles individualmente. La resolución angular se define como la mínima separación angular para la cual dos objetos pueden detectarse por separado.

Las estrellas están tan lejos que son fuentes puntuales, sin embargo, debido a la difracción, un objeto puntual crea una imagen anular con un patrón de difracción característico denominado *disco de Airy* (es el disco central de máxima intensidad en el diagrama de difracción que aparece como una serie de círculos concéntricos claros y oscuros) y conforme las estrellas se van aproximando una a otra, sus imágenes respectivas se superponen. El límite de resolución debido a la difracción puede calcularse de manera empírica a partir de el denominado *criterio de Rayleigh*, aplicando este criterio, las estrellas son precisamente resolubles cuando el centro de un disco de Airy cae en el primer mínimo del patrón de Airy de la otra estrella. Así, la separación angular mínima resoluble o límite angular de resolución está dada por la ecuación 4.14.

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \ (rad), \tag{4.14}$$

donde θ es la resolución angular, λ la longitud de onda y D el diámetro o apertura del instrumento. El factor 1.22 se deriva de un cálculo de la posición del primer anillo de oscuridad rodeando el disco de Airy central. Este factor se utiliza para aproximar la habilidad del ojo humano para distinguir dos fuentes puntuales de luz cuyos discos de Airy se superponen.

Para un radiotelescopio, θ es una medida de la capacidad de selección que tiene una antena y es importante que la antena pueda seleccionar la señal procedente del objeto en estudio con la menor incertidumbre posible debida a la señal de otros objetos. Pero si la separación angular entre los objetos es tan pequeño que ambos quedan dentro del haz primario, entonces no hay manera de distinguir entre si.

En conclusión, un radiotelescopio puede resolver objetos que se encuentran separados por lo menos un ángulo del haz principal. Para una antena circular, esto es del orden de la ecuación 4.14, esta ecuación es importante ya que indica la resolución máxima que se puede alcanzar, es decir con que precisión se puede saber la dirección de donde proviene la señal.



Fig. 4.5: (a) Objetos que caen dentro del mismo haz primario no se pueden distinguir, (b) Objetos superpuestos que no se pueden resolver y (c) Objetos parcialmente superpuestos que se pueden resolver, criterio de Rayleigh.

De la ecuación 4.14 se observa que cuando se quiere una resolución angular alta, es decir θ pequeña, se necesita observar a una longitud de onda pequeña, o bien, con una antena grande. Construir radiotelescopios con grandes antenas no es práctico, además es muy costoso, por lo cual se han diseñado conjuntos de antenas, que dependiendo de su separación hacen la vez de una antena de gran tamaño, estos conjuntos son los llamados *interferómetros.*⁹

Ensanchamiento del haz

En la observación en astronomía es útil clasificar los cuerpos según su tamaño con respecto al elemento de resolución angular del instrumento. Existen dos casos extremos:

- Fuente puntual: Cuando el tamaño angular de la fuente es mucho menor que el haz de la antena. En tal caso se dice la fuente no se puede resolver, o sea, es una fuente puntual.
- Fuente extendida: Cuando el tamaño angular de la fuente es mayor que el haz de la antena. Es decir la fuente está resuelta y es posible ver cierta morfología de la fuente.

⁹MENDOZ P. Avith. Construcción de un Radiotelescopio Basado en Tecnología de Televisión Satelital. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2009.

4.3.4 Angulo Sólido de una Antena

El ángulo sólido del haz de una antena, o área del beam Ω_A , se define como la integral sobre todas las direcciones del diagrama del haz del patrón de potencia normalizado (ecuación 4.4) y está dado por la siguiente ecuación:

$$\Omega_A = \int \int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_n(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi.$$
(4.15)

El ángulo sólido Ω_A está expresado en estereorradianes (sr), e incluye contribuciones de los lóbulos secundarios además del lóbulo principal. El ángulo sólido de una antena también puede ser descrito, en forma aproximada, en términos de los ángulos sustentados por los puntos de potencia media del lóbulo principal en los dos planos principales:

$$\Omega_A \approx \theta_{HP} \,\phi_{HP},\tag{4.16}$$

donde θ_{HP} y ϕ_{HP} son el ancho del haz a potencia media en los dos planos principales (y ortogonales), omitiendo los lóbulos secundarios. En general, la sección transversal del lóbulo principal es una elipse, así que θ_{HP} y ϕ_{HP} corresponden al eje mayor y menor de ésta. Se tiene también que el **ángulo sólido del haz principal**, Ω_M , es la integral para el haz principal del diagrama de radiación y es menor que el ángulo sólido de todo el haz Ω_A .

Lo anteriormente mencionado también se puede expresar en términos del BWFN/2 en los dos planos principales del patrón de antena, así:¹⁰

$$\Omega_A = \left(\frac{BWFN}{2}\right)_{\theta} \left(\frac{BWFN}{2}\right)_{\phi},\tag{4.17}$$

para el caso de una apertura circular se tiene que:

$$\left(\frac{BWFN}{2}\right)_{\theta} \approx \left(\frac{BWFN}{2}\right)_{\phi},$$

por lo tanto el ángulo sólido de la antena con apertura circular se puede expresar así:

$$\Omega_A = \left(\frac{BWFN}{2}\right)^2 \quad (sr). \tag{4.18}$$

4.3.5 Eficiencia de Haz

Ahora se define la eficiencia del haz, en términos del ángulo sólido. La eficiencia de haz principal η , es el cociente entre ángulo sólido del haz principal Ω_M y el ángulo sólido del haz total Ω_A , como se muestra en la siguiente ecuación:

 $^{^{10}\}mathrm{KRAUS},$ John. ANTENNAS. MCGraw Hill . 1997.

$$\eta = \frac{\Omega_M}{\Omega_A},\tag{4.19}$$

donde el ángulo sólido del haz total Ω_A consiste del ángulo sólido del haz principal Ω_M más el ángulo sólido de los lóbulos menores Ω_m .

$$\Omega_A = \Omega_M + \Omega m. \tag{4.20}$$

Los valores que toma la eficiencia del haz son $0 \le \eta \le 1$. En radioastronomía siempre se buscan valores de η cercanos a 1.

4.3.6 Directividad

La directividad es uno de los parámetros más importantes que caracterizan a la antena, se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica.

$$\mathbf{D} = \frac{P(\theta, \phi)_{max}}{P(\theta, \phi)_{prom}},\tag{4.21}$$

donde la potencia promedio sobre una esfera está dada por:

$$P(\theta, \phi)_{prom} = \frac{1}{4\pi} \int \int_{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega \qquad (4.22)$$
$$= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P(\theta, \phi) \sin \theta d\theta.$$

sustituyendo en la directividad, ecuación 4.21, se obtiene:

$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= \frac{P(\theta, \phi)_{max}}{\frac{1}{4\pi} \int \int_{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega} \\
&= \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int \int_{4\pi} [P(\theta, \phi) / P(\theta, \phi)_{max}] d\Omega} \\
&= \frac{4\pi}{\int \int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega}.
\end{aligned}$$
(4.23)

Se reconoce la integral de la última ecuación 4.23 como el ángulo sólido del haz (ecuación 4.15) y por lo tanto la directividad de una antena está dada por:

$$\mathbf{D} = \frac{4\pi(sr)}{\Omega_A(sr)}.\tag{4.24}$$

Por lo tanto, la directividad es la razón entre el ángulo sólido de una esfera $(4\pi sr)$ y el ángulo sólido del haz Ω_A de la antena. Una antena isotrópica tiene la directividad más baja posible $\mathcal{D} = 1$, mientras que las antenas actuales tienen directividades más grandes, con valores de D > 1. Por ejemplo el dipolo más simple tiene una directividad de D = 1.5 y con las antenas parabólicas se consiguen directividades de hasta 10^4 .

Para el caso específico de una apertura grande iluminada uniformemente, se tiene que la directividad está dada por:

$$\mathbf{D} = 4\pi \frac{\mathrm{á}rea}{\lambda^2}.\tag{4.25}$$

Para una apertura circular:

$$\mathbf{D} = 4\pi \frac{\pi D^2}{4\lambda^2} = 9.87 D_{\lambda}^2, \tag{4.26}$$

donde $D_{\lambda} = D/\lambda$, es el diámetro de apertura de la antena en función de la longitud de onda. Generalmente la directividad está dada en decibeles de ganancia o isotrópicos (dBi)¹¹, se le denomina índice de directividad y está relacionada con:

$$\mathcal{D}_{dBi} = 10 \log_{10} \mathcal{D} \tag{4.27}$$

4.3.7 Ganancia

Es una de las características más importantes de una antena, viene a ser la mayor concentración de la señal. La ganancia de una antena está relacionada con la directividad, pero tomando en cuenta pérdidas óhmicas. La razón de la ganancia y la directividad se conoce como el factor de eficiencia de la antena $k, 0 \le k \le 1$, que es adimensional.

$$G = k \mathcal{D}. \tag{4.28}$$

La ganancia se emplea para expresar el aumento de la potencia que puede recibir una antena en una dirección dada, se define como una función de θ y ϕ (es decir, depende de la dirección). Hay que tener en cuenta que generalmente se usa «ganancia» para indicar una ganancia máxima. Dado que algunas antenas radian mayor potencia en una dirección que en otras, por consiguiente la ganancia es la cantidad de potencia radiada en una dirección a expensas de una reducción de potencia radiada en otras direcciones. La ganancia siempre está relacionada con el lóbulo principal y se especifica en la dirección de máxima radiación, a menos que se indique lo contrario. En una antena, la potencia de entrada se transforma en potencia radiada, donde una pequeña parte, se absorbe debido a las pérdidas del conductor y del dieléctrico utilizado. Si la antena es 100% eficiente, entonces la potencia de entrada será igual a la potencia radiada por la antena.

La ganancia teórica de una antena parabólica está dada por:

 $^{^{11}{\}rm Son}$ los Decibeles de ganancia sobre un radiador isotrópico o una relación logarítmica entre la potencia de emisión de una antena en relación a un radiador isotrópico.

$$G = \left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2,\tag{4.29}$$

donde D es el diámetro de la apertura, λ es la longitud de onda en el espacio libre. La expresión anterior supone una eficiencia de 100%, lo que no se da en la práctica. Para hacer un uso efectivo del área del reflector parabólico la energía debe estar distribuida uniformemente sobre la superficie. Sin embargo, hay diversos factores inevitables que reducen la eficiencia entre ellos.

Para una apertura circular, se puede expresar la ganancia con la siguiente relación:

$$G = 6D_{\lambda}^2,\tag{4.30}$$

donde $D_{\lambda} = D/\lambda$, es el diámetro de apertura de la antena en función de la longitud de onda.

4.3.8 Polarización

La polarización de una antena corresponde a la polarización de los campos irradiados por ésta, evaluados en un campo lejano. Normalmente se clasifican en *Polarización lineal o circular*. Es importante hacer esta clasificación ya que por ejemplo una antena con polarización horizontal no se podrá comunicar con una vertical. Por reciprocidad las antenas deben transmitir y recibir de la misma manera. Si dos antenas linealmente polarizadas están rotadas en un cierto ángulo, habrá una pérdida de potencia.

La polarización de una onda radiada, se define como el vector del campo eléctrico que se mueve en función del tiempo sobre un punto fijo en el espacio. La punta del vector describe la figura geométrica que forma la polarización.

En en la figura 4.6 se muestran cuatro tipos de polarización, y se indican las diferentes giros que adquieren esta adquieren. Esta característica, designa la orientación de las ondas electromagnéticas al salir (o entrar) a la antena, es decir que designa la dirección o posición a la que se encuentra el campo eléctrico \mathbf{E} al momento de ser radiado. Sabiendo que las ondas electromagnéticas pueden presentar dos campos, uno eléctrico \mathbf{E} y otro magnético \mathbf{H} , se puede determinar a través del campo eléctrico el tipo de polarización existe en determinadas antenas, estos dos campos siempre están perpendiculares entre si. La polarización se encuentra dividida en varios tipos, los más básicos son:

• **Polarización Lineal**: Esta polarización se da cuando el campo eléctrico se encuentra en una sola posición al ser emitido en la señal sin que nunca cambie su posición al momento de ser emitidas, existen dos tipos de polarizaciones lineales: *polarización horizontal* y *polarización vertical*. La polarización lineal vertical se obtiene cuando el campo eléctrico, se mueve a lo largo de la tierra en el plano



Fig. 4.6: Tipos de polarización de una onda electromagnética. Dominio Público Wikimedia Commons.

vertical y la polarización lineal horizontal es aquella que oscila paralelamente con la tierra.

• Polarización circular: Este tipo de polarizaciones muestra un campo eléctrico en movimiento giratorio continuo formando círculos, algo parecido a una espiral constante en movimiento, existen dos tipos de polarizaciones circulares: *Polarización circular derecha* la cual se forma cuando el campo eléctrico gira de acuerdo al movimiento de las agujas del reloj y la *Polarización circular izquierda*, la cual se forma cuando el campo eléctrico a las agujas del reloj.

Es importante conocer que la característica de radiación del alimentador de una antena debe ser tal que todas las ondas estén polarizadas en la misma dirección después de ser reflejadas por el paraboloide. Todas las componentes del campo que se radíen con polarización perpendicular a la deseada se pierden y contribuyen a la radiación por lóbulos secundarios. Por lo general, esta radiación se concentra en cuatro lóbulos menores localizados en cuadrantes entre el plano de polarización y un plano perpendicular que intersecta el eje del paraboloide.

4.3.9 Área efectiva

Se define como la relación entre la potencia recibida y la densidad de potencia incidente en una antena. Si se considera una onda plana, no polarizada, incidente sobre la antena. Se puede definir su área efectiva A_{ef} en términos de la potencia recibida P así:

$$P = \frac{1}{2} A_{ef} S_{\nu} d\nu, \qquad (4.31)$$

donde S_{ν} es la densidad de flujo (ecuación 3.12) y tiene unidades de potencia por unidad de área por unidad de frecuencia $(Wm^{-2}Hz^{-1})$ y $d\nu$ es el ancho de banda.

Hay un teorema muy general, el cual se aplica a cualquier sistema alimentado por un sistema de transmisión de un sólo modo, sin pérdidas en el límite de difracción, el cual relaciona el área efectiva, el ángulo sólido de la antena, y la longitud de onda. A este teorema se le suele llamar *teorema de antena* y está dado por la ecuación 4.32

$$A_{ef}\Omega_A = \lambda^2. \tag{4.32}$$

Esto significa que cualquier tipo de antena unida a un sistema de un sólo modo no puede cambiar arbitrariamente el ángulo sólido Ω_A y el área efectiva A_{ef} , es decir que su producto es fijo, de manera que si se hace algo para incrementar el ángulo sólido de la antena, inevitablemente se reduciría el área efectiva.

En la siguiente tabla 4.1, se hace una descripción de algunos tipos de antena, con algunas características como: patrón de radiación, ganancia, directividad y polaridad, teniendo en cuenta que para este trabajo se usa una antena parabólica, se puede observar que tiene varias ventajas respecto a otros tipos de antena.

Patrón de radiación	Ganancia	Directividad	Polarización	
Dipolo	Amplio	Baja	Baja	Lineal
Dipolo Multi - Elemento	Amplio	Baja/Media	Baja	Lineal
Panel Plano	Amplio	Media	Media/Alta	Lineal/Circular
Plato Parabólico	Amplio	Alta	Alta	Lineal/Circular
Yagi	Amplio	Media/Alta	Media/Alta	Lineal
Ranura	Amplio	Baja/Media	Baja/Media	Lineal

Tabla 4.1: Comparación parámetros de diferentes tipos de antena.

[7][15][3][8]

4.4 Teoría del Receptor

El diseño del radiotelescopio de este trabajo, maneja un receptor que está basado en un sistema denominado **Super Heterodino**. Dado que la señal de radio que llega al sistema de un radiotelescopio no puede ser procesada directamente, se tiene que adecuar de manera que pueda llegar a la etapa de registro, por lo tanto el sistema heterodino se encarga de trasformar dicha señal a unas frecuencias adecuadas que se puedan transmitir por una linea de transmisión o cable coaxial. A continuación se exponen las características más importantes de dicho sistema. El receptor superheterodino es un diseño de amplificador de RF utilizado casi universalmente en todo equipo receptor, se usa en radio, televisión y radar, debido a que sus características de ganancia, selectividad y sensitividad son superiores a las otras configuraciones de receptores. El esquema clásico de un receptor superheterodino se muestra en la figura 4.7.



Fig. 4.7: Diagrama de un receptor superheterodino típico. Dominio Público Wikimedia Commons.

Heterodinar significa generar una frecuencia a partir de la mezcla de otras dos, es decir, dos señales con frecuencias definidas se mezclan a fin de obtener la suma o diferencia de las dos frecuencias de entrada. Los receptores superheterodinos basan su funcionamiento en la utilización de una o mas etapas mezcladoras, éstas trasladan la frecuencia de recepción a un valor de frecuencia normalizado, generalmente menor, denominado **Frecuencia Intermedia (FI)**.

Las etapas principales para un receptor superheterodino en radioastronomía se describen a continuación:

El primer paso consiste de una *etapa amplificadora de RF* que amplifica la señal débil proveniente de la antena. A continuación le sigue el *convertidor de frecuencia* que es la etapa clave que distingue a este tipo de receptor. El convertidor de frecuencia es el encargado de trasladar una banda de frecuencias que nos interesa recibir a otro lugar del espectro donde es más fácil procesarla. La señal de salida del convertidor se conoce como la banda de *Frecuencia Intermedia*. Enseguida un filtro pasa bajas selecciona la frecuencia donde está contenida la información (FI) eliminando cualquier otra. La señal FI todavía es débil por lo que se aplica a una o más *etapas amplificadoras de la FI*. Luego se encuentra el *detector*, encargado de recuperar la potencia llevada por la señal. Finalmente está el *integrador* que suaviza la señal y proporciona la ganancia adecuada para que puedan ser registrados los datos.

4.4.1 Amplificador de RF

El amplificador de RF se constituye por una etapa amplificadora y un filtro pasa-banda, que aísla la señal que deseamos recibir del resto de las señales que llegan a la antena. Este filtro pasabandas es genérico, por lo que tiene poca selectividad en frecuencia. El objetivo principal de esta etapa es la de conferir al receptor el rechazo adecuado a las señales de Frecuencia Imagen¹², la señal de frecuencia imagen está separada de la señal que se desea recibir en un valor igual a dos veces la FI, si esta señal de frecuencia imagen llega al mezclador, el receptor ya no será capaz de eliminarla.

El transistor a utilizar como amplificador en esta etapa debe ser seleccionado cuidadosamente, el parámetro mas importante a tener en cuenta es la *relación señal a ruido*. La señal que ingresa por antena puede presentar muy bajo nivel, pudiendo ser del orden del μ V o menos, cuanto menor es, mas sensible debe ser el receptor. Las características más importantes que debe presentar un amplificador de RF son las siguientes:

• Ganancia del amplificador (G_a) : El parámetro más importante que se considera en los amplificadores es su ganancia, para los amplificadores la ganancia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

$$G_a = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}.$$
(4.33)

La ganancia en decibeles (dB) está definida como:

$$G_a = 10 \log_{10} \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}.$$
(4.34)

 Relación señal a ruido: Existen varias formas de medir el ruido en un amplificador, una de ellas es con el *factor de ruido* (F). El Factor de ruido está definido como el cociente entre la relación de *señal/ruido de entrada* y la relación de *señal/ruido de salida* del amplificador, como muestra la ecuación 4.35.

$$F = \frac{S_e/R_e}{S_s/R_s},\tag{4.35}$$

donde F es el factor de ruido, S_e es el nivel de la señal de entrada , R_e es el nivel de ruido de entrada, S_s el nivel de la señal de salida y R_s es el nivel de salida del ruido. Se debe tener en cuenta que en un amplificador la señal de ruido de salida siempre será mayor que la de entrada, por lo que la razón de S_s/R_s es menor que S_e/R_e lo que significa que F siempre será mayor que uno.

 $^{^{12}\}mathrm{Es}$ una frecuencia de entrada no deseada que puede llegar al sistema.

El factor de ruido también puede ser expresado en decibeles (dB), obteniendo el nuevo nombre de figura de ruido (NF) y está dado por la ecuación 4.36

$$NF = 10\log_{10} F.$$
 (4.36)

4.4.2 Mezclador y Oscilador Local

En radioastronomía los sistemas de observación se realizan a frecuencias muy altas, por lo cual se necesita convertir a frecuencias mucho más bajas para poder hacer su análisis y adecuado manejo. Para la conversión de frecuencia, se utiliza un *mezclador* que combina la señal original (RF) con la del *oscilador local* (OL), a este proceso se llama *heterodinaje*, dando como resultado la señal de frecuencia llamada *Frecuencia intermedia* (FI).

- Oscilador local: Es el componente con el cual generamos una señal artificial para introducirla al mezclador. Este proporciona la componente de frecuencia que se debe mezclar con la señal de RF que ingresa por la antena, produciendo a la salida del mezclador la señal de Frecuencia Intermedia (FI)
- Mezclador: Un mezclador es sumamente importante en los sistemas RF, es un circuito no lineal variante con el tiempo o un dispositivo capaz de mezclar dos señales de entrada. Cuando estas señales son introducidas al mezclador obtenemos como resultado dos señales diferentes a las originales, la primera es la suma de las dos señales y la segunda es la diferencia de ellas.

Para elegir la señal deseada se coloca un filtro de pasa-bajas¹³ o de pasa- altas¹⁴. Generalmente en radioastronomía sólo se usa la frecuencia diferencia y se elimina la frecuencia suma con un filtro pasa bajas apropiado. A la señal resultante se le conoce como *frecuencia intermedia o señal FI*, la cual proporciona exactamente la misma información que la señal inicial, pero a otra frecuencia evitando las inestabilidades que se pudieran generar.

En el alimentador o detector que se usa en este trabajo (LNB) la mezcla se produce entre las dos señales, mediante filtrado y se tiene que la FI está comprendida entre **950 MHz** y **2150 MHz**. Dado que la banda Ku tiene 2.05 GHz de ancho de banda (10.7 a 12.75 GHz) existe una subdivisión en dos sub-bandas denominadas banda baja (10.7 a 11.7 GHz) y banda alta (11.7 a 12.75 GHz).

¹³Filtro electrónico caracterizado por permitir el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias más altas

¹⁴Tipo de filtro electrónico en cuya respuesta en frecuencia se atenúan las componentes de baja frecuencia pero no las de alta frecuencia

Si la frecuencia del oscilador local es 9.75 GHz, y la frecuencia de entrada es de 10.7 GHz, la frecuencia intermedia FI tendrá un valor de:

FI = (10.7 - 9.75)GHz = 0.950 GHz = 950 MHz.

4.4.3 Amplificador de FI

La señal de FI que sale del mezclador es aún débil, se requiere amplificarla antes de procesarla en el detector. Se pueden tener uno o varios amplificadores de FI para obtener mejores resultados, la mayor parte de la ganancia entre los terminales de antena y el detector la proporciona el amplificador de FI, sus filtros se diseñan para rechazar señales de canales adyacentes, así como respuestas falsas que pueden provenir del mezclador. En esta etapa se amplifica la frecuencia intermedia producida en las etapas del mezclador además el amplificador de FI proporciona la selectividad necesaria para rechazar las señales de RF, las del oscilador y la suma de las señales producidas por el batido entre las señales de RF y del oscilador. La función del amplificador está íntimamente relacionada con el control de ganancia o regulación de amplificación.

4.4.4 Detector

El detector demodula la señal de frecuencia intermedia, es decir, recupera el espectro de la señal original y el amplificador le da a la señal de salida la ganancia que necesita. El propósito del detector es el de obtener de la señal de FI la información que ella trae consigo, la constitución de esta etapa depende del tipo de modulación utilizada en el transmisor, de esta forma podrá ser sumamente sencillo o complejo efectuar la demodulación. En radioastronomía, la señal es simplemente la potencia como función de frecuencia, tiempo o polarización

Existen varias formas de detectar la potencia de la señal recibida, utilizando distintas técnicas y con diferentes diseños según el motivo de la observación. Hay dos tipos de radiaciones que definen el tipo de procesamiento y medición de la potencia: la continua y de línea espectral. La primera mide la potencia promediada sobre un amplio rango de frecuencias mientras que la segunda mide la potencia como función de frecuencia.

4.4.5 Integrador

El integrador es un dispositivo que suaviza la señal de entrada, con el fin de eliminar fluctuaciones no significativas antes de ser grabados los datos. Un integrador es un simple circuito RC en serie. En este caso se trata de un filtro pasa bajas, cuando llega una señal de entrada se eleva rápidamente al máximo cargando el capacitor exponencialmente debido a la resistencia, deformando la señal. Cuando la señal de entrada cae a cero, se descarga exponencialmente el capacitor a cero a través de la resistencia.
4.5 Registro de datos

Esta última fase consiste en el almacenamiento de la señal que está registrando el radiotelescopio en un ordenador, es decir que se trata del registro de los datos que salen del detector. Es bastante común que se realice de forma digital, en el caso de este trabajo se realiza la conversión mediante una tarjeta llamada **Arduino Uno R3**, cuyas características se muestran más adelante.

Con los datos registrados, se puede realizar el análisis deseado que se le quiera dar a la información proveniente de los cuerpos celestes y calcular distintos parámetros del propio instrumento.

[7][15][3]

Capítulo 5

Construcción de un Radiotelescopio de 83 cm de Diámetro

En el capítulo anterior se abarcó de forma detallada la información acerca de los fundamentos principales de la radioastronomía y la teoría de antenas. Como el objetivo principal de este trabajo consiste en la construcción de un radiotelescopio capaz de detectar emisiones de radio procedentes del Sol, en este capítulo se aborda de forma detallada dicho proceso.

Inicialmente se realiza una descripción general de las especificaciones técnicas de los elementos que componen el instrumento, con el fin de entender el total funcionamiento del mismo. Luego se muestra el proceso de modificación de algunos componentes y finalmente en la última sección se expone el desarrollo del ensamble de cada una de las piezas para obtener la estructura completa del radiotelescopio.

El esquema de los componentes principales que conforman el radiotelescopio, se presenta en el diagrama de la figura 5.1. Antena, LNB, sat finder, es decir el buscador de satélites (con su respectiva fuente de voltaje), circuito amplificador, conversor análogo-digital de la señal y el registro. Cada componente se describen con mayor detalle más adelante.

5.1 Elementos que conforman el Radiotelescopio

A continuación, se muestra el listado y las características principales de los elementos usados para la construcción del radiotelescopio de 83 cm de diámetro: módulo de antena, sat finder o buscador de satélites, circuito amplificador, tarjeta Arduino Uno R3, y componentes secundarios adicionales. La correcta modificación y uso de los elementos mencionados es fundamental para el adecuado funcionamiento cuando se realiza el acople final de todo el dispositivo.



Fig. 5.1: Esquema de las partes principales de un Radiotelescopio. Imagen fuente de esta investigación.

Cabe mencionar que algunos de los componentes básicos, fueron adquiridos con recursos del Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, dada la dificultad de encontrarlos en la ciudad de Pasto, se realizó la compra a la tienda de electrónica en línea, Didácticas Electrónicas de la ciudad de Medellín, Colombia. También es necesario reconocer que algunos de los componentes como el buscador de satélites, la antena parabólica junto con el LNB, y las tarjetas donde se acopla el circuito amplificador, no son fáciles de conseguir por lo tanto la compra se realizó en diferentes tiendas online de electrónica del país.

5.2 Módulo de Antena

El módulo de antena es uno de los principales componentes del radiotelescopio, consiste en un *plato reflector* y el detector de la señal llamado *LNB (Low Noise Block)* o amplificador de bajo ruido, a continuación se hace referencia a las especificaciones técnicas de estos elementos.

5.2.1 Antena Parabólica Offset

Cuando se desea la máxima directividad de una antena, la forma del reflector generalmente es parabólica, con la fuente primaria localizada en el foco y dirigida hacia el reflector. Las antenas con reflector parabólico o simplemente antenas parabólicas se utilizan extensamente en sistemas de comunicaciones en las bandas de UHF a partir de unos 800 MHz, en SHF y EHF. Entre sus características principales se encuentran la sencillez de construcción y elevada direccionalidad. La forma más habitual del reflector es la de un paraboloide de revolución, excitado por un alimentador situado en el foco.

La antena utilizada en este trabajo es una antena tipo reflectora *parabólica offset*, que consiste en un plato reflector de 83 cm de diámetro mayor, cuya superficie se encarga de concentrar la radiación electromagnética incidente de un cuerpo celeste en su foco, donde se encuentra el detector LNB. La antena es de la compañía *Tigo Star*, su uso frecuente es para televisión satelital.

La antena parabólica de foco desplazado u offset, se caracteriza por tener el reflector parabólico desplazado respecto al foco. Son más eficientes que las parabólicas de foco centrado, porque el alimentador no hace sombra sobre la superficie reflectora. Aunque no es de forma parabólica propiamente dicha, su forma es una sección de un reflector paraboloide de forma oval, es decir que la superficie de la antena ya no es completamente redonda, sino ligeramente ovalada y el punto focal no está montado en el centro del plato, sino a un lado del mismo. La antena parabólica tiene una alta ganancia y directividad.



Fig. 5.2: Esquema de una antena parabólica Offset, la superficie se encarga de concentrar la radiación incidente en su foco. Imagen fuente de esta investigación.

5.2.2 Especificaciones Técnicas Antena Parabólica Offset

En la tabla 5.1 se muestran las principales características de la antena usada, las especificaciones técnicas de los parámetros como: frecuencia detectada, diámetro del eje mayor, diámetro del eje menor, profundidad del plato, que son medidas tomadas directamente de la medición al plato parabólico. Las otras descripciones han sido calculadas con el software *Calculador de parábolas WiFi x Challenger V.3.0.*¹ En la figura 5.3 se muestra la antena usada para este proyecto.



Fig. 5.3: Antena parabólica offset usada para la construcción de un radiotelescopio de 83 cm de diámetro mayor.

En la figura 5.4 se muestra la interfaz del programa Calculador de parábolas WiFi x Challenger V.3.0. el cual arroja la siguiente información:

• Este reflector offset es una sección de una parábola completa, cuyo vértice está en el borde inferior del reflector offset. La parábola completa tendría un f/D = 0.32, que determina la longitud focal.

¹CHALLENGER Calculator. El Calculador de Parábolas WiFi x Challenger V3.0, es un programa para realizar cálculos de parábolas, especialmente orientado al entorno WiFi. Es libre y gratuito. Puede ser usado y distribuido libremente. 2017.

Frecuencia Detectada	10.70 - 12.75 GHz
Diámetro del Eje Mayor	830 mm
Diámetro del Eje Menor	$754 \mathrm{~mm}$
Profundidad del Plato	70 mm
Distancia Focal	$497{,}59~\mathrm{mm}$

Tabla 5.1: Especificaciones principales de la Antena Parabólica Offset.



Fig. 5.4: Datos de antena, dados por el programa Calculador de parábolas WiFi x Challenger V.3.0.

- El punto focal de esta parábola es 497.59 mm desde el borde inferior del reflector y 798.28 mm desde el borde superior del reflector.
- Para la operación con el haz principal en el horizonte con el feed (alimentador) en el fondo, el plato debe estar inclinado hacia adelante de modo que el eje mayor esté a 68.76° sobre el horizonte.
- Ganancia al 50% eficiencia = 35.58 dBi. Se podría obtener 60% de eficiencia para una ganancia = 36.37 dBi.

5.3 Detector LNB (Low Noise Block)

El detector, también llamado alimentador que viene incluido con el plato reflector, en este caso se denomina KU Band Universal Twin LNBF, modelo GKF-D22Z de la compañía Tigo Star. Un LNBF es un LNB, con un FeedHorn integrado, es decir un tubo de metal en forma de corneta, el cual direcciona la señal reflejada por el plato parabólico. Por lo tanto, al LNBF se le conoce simplemente como LNB.

El Bloque de Bajo Ruido o conversor de reducción de ruido, conocido como LNB, por sus siglas en Inglés Low Noise Block Converter, es un dispositivo que se sitúa en el foco del plato parabólico, es el encargado de detectar, adaptar y distribuir la señal recibida. Dado que la señal que captan las antenas receptoras es de muy baja potencia, es necesario amplificarla para lograr una recepción adecuada. Además, las frecuencias detectadas son muy altas y no es posible que se puedan distribuir por los cables coaxiales, de modo que este dispositivo es fundamental para convertir la señal de alta frecuencia de Banda Ku, en una señal de menor frecuencia, para que sea posible su distribución a través del cableado coaxial. A esta banda se le denomina *Frecuencia Intermedia* (FI), la cual está comprendida entre 950 MHz y 2.150 MHz.

El bloque de bajo ruido es el corazón real de la antena parabólica. Básicamente, es un resonador con una cavidad que recibe las señales, enfocadas que se reflejan en el plato parabólico, para luego procesarlas. Un interruptor electrónico adicional amplifica estas señales antes de que las envíe al cable y las convierte en una frecuencia más baja para minimizar la pérdida de señal en los cables.²

5.3.1 Funcionamiento de un LNB

Un alimentador ideal debe radiar una onda esférica que al ser reflejada por el paraboloide se convierte en una onda plana. Inversamente, en la antena receptora la onda plana reflejada por el reflector parabólico se vuelve esférica hacia el alimentador. Como se puede apreciar en la figura 5.5 un LNB está compuesto por tres partes principales, un alimentador, una cavidad resonante y la electrónica correspondiente del circuito interno.

El circuito interno de un LNB contiene principalmente MMICs (del acrónimo inglés Monolithic Microwave Integrated Circuits) en base de transistores de efecto de campo, compuestos por arseniuro de galio (GASFET), que poseen las características de funcionar a altas frecuencias con bajo ruido.

Un LNB consta de varios elementos en su interior, para llevar a cabo el proceso de transmisión de la señal que está detectando. En primer lugar la señal es transmitida a través de una guía de onda, hacia dos pequeños dipolos que detectan dicha señal, que luego es amplificada, mas adelante se realiza una conversión de frecuencia y finalmente se

²KOPPITZ, Heinz. ¿Qué es un LNB y para qué sirve?. TELE-satellite International. 2017.



Fig. 5.5: Esquema partes principales de un LNB.

obtiene una señal de baja frecuencia con idénticas características que la señal original. Para realizar este proceso cuenta con varios bloques que se describen brevemente a continuación, puesto que estos conceptos se abarcaron con detalle en el capítulo 4.

Inicialmente un amplificador incrementa la intensidad de la señal, luego esta el *Band Pass Filter* (BPF) o filtro pasa banda, que permite el filtrado de frecuencia, es decir, limita el ruido de entrada al mezclador. Este filtro viene seguido de un mezclador (MIX), que tiene la función de convertir la señal de microondas en frecuencia intermedia a la salida del mezclador, es decir, hace una diferencia entre la frecuencia recibida, menos la frecuencia del oscilador local (OL), en la mezcla se producen batidos entre las dos señales (sumas y restas de frecuencias), de éstas mediante filtrado se llega a la banda de frecuencia intermedia (FI). Finalmente se llega a la etapa del filtro llamado *Low Pass Filter* (LPF) o filtro pasa bajas.

5.3.2 Especificaciones Técnicas LNB

En la tabla 5.2 se muestran las características más relevantes del detector de señal, las especificaciones técnicas han sido tomadas del manual de fabricante. En la figura 5.6 se muestra el detector LNB usado para este trabajo y el la imagen 5.7 se puede observar como se ve dicho dispositivo internamente.

Modelo	GKF - D22Z
Rango de frecuencia Detectada	10.7 GHz a 12.75 GHz
Frecuencia de Salida	950 MHz - 2150 MHz
Ganancia	55 dB (Min)

Tabla 5.2: Especificaciones principales del LNB.



Fig. 5.6: LNB (Low Noise Block). Dominio público, Wikipedia.



Fig. 5.7: Estructura interna de un LNB. Dominio público, Wikipedia.

Para realizar la conexión del LNB con el siguiente elemento, es decir el buscador satelital, se requiere cable coaxial de buena calidad, en este caso se ha usado cable coaxial RG6, que tiene las siguientes especificaciones técnicas, tomadas del manual de fabricante Cable coaxial RG 6/U. INDECA Industria del cable:

- Conductor central: Alambre único de cobre rojo de 0.75 mm de diámetro \pm 0.01 mm.
- Dieléctrico: Polietileno de baja densidad compacto (PEBD) de 4.65 mm de diámetro \pm 0.2 mm.
- Blindaje: Malla trenzada de alambres de cobre rojo de 0.15 mm y de 8 alambres por dieciséis husos (8 x 16 x 0.15) cobertura 92%.
- Cubierta exterior: (PVC) polic
loruro de vinilo flexible de 7 mm de diámetro \pm 0.2 mm color negro, ap
to intemperie.
- Marcación identificadora: Hecha con tintas para PVC a lo largo del cable con una separación no mayor a 20 cm y de manera resistente a la manipulación.
- Impedancia: 75 $\Omega.$
- Capacidad: 67 pF/m.
- Velocidad nominal de propagación: 66%.
- Tensión máxima: 2.5 KV.

5.4 Buscador de satélites

El buscador de satélites o sat finder es un dispositivo electrónico de uso comercial que mide la señal de satélite, es utilizado como instrumento para direccionar las antenas parabólicas. Por lo general están provistos de un s-meter o galvanómetro³ en una escala en decibeles (dB) y un potenciómetro de sensibilidad. Al apuntar la antena hacia el satélite, el s-meter se satura, entonces se puede ajustar la sensibilidad para poder alinear con más precisión.⁴

El sat finder tiene dos conectores a cada lado, marcados como **LNB** en un extremo y **RCVR** en el opuesto, como se puede apreciar en la imagen 5.8. RCVR (Receiver) es el lado donde se conecta la fuente que suministra energía al receptor y el lado del LNB indica la conexión con la antena parabólica mediante cable coaxial. En la parte frontal inferior derecha, tiene un potenciómetro que está enlazado con el galvanómetro, se usa para regular la señal recibida cuando se satura, además puede ser escuchada por el zumbador que tiene incluido en su interior.

Para ajustar el control de nivel del buscador se debe mover el potenciómetro, el cual modifica la sensibilidad del dispositivo. Así al girar el botón en sentido de las manecillas

³Instrumento que sirve para determinar la intensidad y el sentido de una corriente eléctrica mediante la desviación que ésta produce en una aguja magnética.

⁴WIKIMEDIA. Buscador de Satélites. Wikipedia, Fundación Wikimedia, Inc. 2016.

del reloj aumenta la sensibilidad del buscador y cuando se gira en sentido contrario de las manecillas del reloj la sensibilidad disminuye. El método para direccionar una antena parabólica es apuntar hacia el satélite que se desea recepcionar cuando el sat finder se satura se baja la sensibilidad con el potenciómetro, luego se mueve lentamente la antena de tal manera que se halla un punto donde el buscador vuelve a subir el nivel de la señal y así sucesivamente hasta hallar la mejor recepción de dicho satélite. En la figura 5.8 se indica el buscador satelital usado en este trabajo.



Fig. 5.8: Buscador Satelital ASKA SF - 9522

5.4.1 Especificaciones Técnicas Buscador de satélites

En la tabla 5.3 se muestran las principales características del buscador de satélites, las especificaciones técnicas han sido tomadas del manual de fabricante.

Modelo	ASKA SF - 9522
Rango de Frecuencia	950 - 2050 MHz
Impedancia	$75 \ \Omega$
Nivel de Entrada	(-25) - 75 dBm
Voltaje de Funcionamiento	12 - 18 VDC

Tabla 5.3: Especificaciones principales del Sat Finder.

5.5 Circuito Amplificador

Este circuito es el encargado de recibir la señal de voltaje proveniente del buscador de satélites, la amplifica y la estabiliza hasta un voltaje adecuado para ser digitalizada. Se compone principalmente de un amplificador operacional (AO) de referencia LM741, en la figura 5.9 se observa el AO usado en este trabajo.



Fig. 5.9: Amplificador Operacional LM741.

El AO se utiliza para aumentar el valor de la señal de entrada generalmente muy pequeña y así obtener una señal a la salida con una amplitud mucho mayor a la señal original. Para construir el circuito amplificador, además del AO, son necesarios otros componentes:

- Resistencias de $1 {\rm K} \Omega$
- Resistencias de $10 \mathrm{K}\Omega$
- Fuente de voltaje de 9V

En la tabla 5.4 se muestran las principales características del amplificador operacional, las especificaciones técnicas han sido tomadas del manual de fabricante.⁵

Ancho de banda	1MHz
Velocidad de respuesta	$0.5~V/\mu s$
Voltaje de alimentación máx	22 V
Temperatura de funcionamiento	$0-70~^{\circ}\mathrm{C}$
Encapsulado DIP	8 Pines

Tabla 5.4:Especificaciones principales Amplificador OperacionalLM741.

⁵TEXAS Instruments. LM741 Operational Amplifier. DATASHEET. 2017.



Fig. 5.10: Esquema del Amplificador Operacional LM741. Dominio público, Wikimedia Commons.

Pines

Como se puede observar en la figura 5.10 Aunque el chip dispone de ocho patillas (pines) tres de ellas se reservan para funciones especiales, el resto tienen asignadas las siguientes funciones:

- Pin 2: Entrada de señal inversora.
- Pin 3: Entrada de señal no inversora.
- **Pin 6**: Terminal de salida.
- **Pin 7**: Terminal de alimentación positiva (Vcc).
- Pin 4: Terminal de alimentación negativa (-Vcc).

5.6 Tarjeta Arduino UNO R3

Para almacenar los datos de una señal analógica se requiere digitalizarlos para analizar e interpretar sus valores. Al obtener una señal digitalizada se puede leer y guardar la información para después poder manipular y realizar un adecuado análisis de dichos datos. Para este propósito se usa la plataforma llamada Arduino UNO, la cual permite convertir una señal analógica proveniente del circuito amplificador a una señal digital de manera sencilla.

Arduino es una plataforma de desarrollo de computación física de código abierto, la cual permite programar de forma sencilla algunos micro controladores, con el fin de realizar proyectos y modificaciones tanto de hardware como de software, la tarjeta usada para este trabajo, está basada en una placa con un micro controlador ATmega328p y un entorno de desarrollo, que permite crear software dependiendo del proyecto que se desee desarrollar.

El micro controlador ATmega328 es un circuito integrado de alto rendimiento, programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Además, la tarjeta con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB, que permite programar el micro controlador desde cualquier computadora, de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip.⁶

Arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que se puede conectar cualquier dispositivo capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V. También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje.

5.6.1 Especificaciones Técnicas Arduino Uno R3

En la tabla 5.5 se muestran las principales características de la tarjeta arduino, las especificaciones técnicas han sido tomadas del manual de fabricante⁷, en la figura 5.11 se muestra la parte frontal de la tarjeta Arduino Uno usada en este trabajo y en la figura 5.12 se indica la parte posterior.

Micro controlador	ATmega328P	
Voltaje de operación	5 V	
Voltaje de entrada (Recomendado)	$7-12~{ m V}$	
Voltaje de entrada (Límite)	$6-20~{ m V}$	
Pines para entrada- salida digital	14	
Pines de entrada analógica	6	
Corriente DC por Pin	20 - 40 mA	
Corriente DC para Pin 3.3 V	50 - 60 mA	
Memoria Flash	32 KB	
Frecuencia de Reloj	16 MHz	
$\operatorname{Longitud}$	68.6 mm	
Ancho	53.4 mm	
Peso	20 g	

Tabla 5.5: Especificaciones principales Tarjeta Arduino.

⁶ATMEGA Corporation. ATMEL DATASHEET COMPLETE. Datasheet. 2016. ⁷ARDUINO. Arduino Uno R3. Arduino.cc. 2017.



Fig. 5.11: Parte frontal, tarjeta arduino uno R3.



Fig. 5.12: Parte posterior, tarjeta arduino uno R3.

Descripción del funcionamiento básico de una Tarjeta Arduino Uno R3

La placa posee 14 pines digitales, que se puede usar como entrada o como salida, funcionan a 5 V, cada pin puede suministrar hasta 40 mA y la intensidad máxima de entrada también es de 40 mA.

Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia interna de entre 20 K Ω y 50 K Ω que está desconectada, a menos que se programe a la tarjeta para que se active. Estas resistencias llamadas *pull up* y *pull down*, son resistencias normales pero

que están dispuestas en un circuito de una manera determinada.

En la figura 5.13 se indica el esquema general de una tarjeta Arduino Uno R3, señalando los pines principales, ademas a continuación, se hace una descripción general de estos con el fin de entender un poco el funcionamiento de la placa.



Fig. 5.13: Esquema arduino uno, muestra las partes principales de la placa. HERNÁNDEZ César. INFOOTEC.NETCopyright Blog sitio Web. 2017

- **Pin VIN**: Este pin se puede usar de varias formas, cuando se tiene una fuente de alimentación conectada mediante un adaptador, lo que se puede hacer mediante este pin es obtener la alimentación para conectar otro dispositivo, pero se debe tener en cuenta que la placa no regula la tensión. Por otro lado, al conectar con USB, la tensión se regula a 5 V.
- **Pin GND**: El pin GND es la toma de tierra, 0V.
- Pin 5 V: Tiene varias funciones, se puede alimentar la placa mediante este pin, siempre que se tenga la fuente externa regulada a 5 V. Por otro lado, si la placa es alimentada tanto por el Jack como por USB, se puede alimentar otro componente con una tensión regulada de 5 V.
- Pin 3.3 V: Por este pin sale una tensión de 3.3 V que es alimentada mediante el conector Jack o el USB. Los 3.3 V se utilizan para alimentar dispositivos que requieren una tensión baja.
- Pines de entradas analógicas: La placa de Arduino cuenta con 6 pines de entradas analógicas, que van desde el pin A0 al A5, de los cuales proporcionan

10
bits, llamados bits de resolución. La tensión que miden va de 0 a 5 V. Soportan conversiones analógico-digital (ADC), utilizando la función analog
Read() en el código de programación.

- **Pin RESET**: Este pin tiene el mismo funcionamiento que el botón RESET, se utiliza para reiniciar el micro controlador.
- Pines de entradas y salidas digitales: Las entradas y salidas digitales son 14 y van desde el pin 0 al 13 y ofrecen una tensión de 5 V.
- Pines Seriales TX y RX: Estos pines se utilizan para recibir y transmitir datos en serie. Por medio de un puerto serie se envía la información mediante una secuencia de bits. Para ello se necesitan al menos dos conectores para realizar la comunicación de datos RX (recepción) y TX (transmisión).
- Alimentación de Arduino: Puede alimentarse directamente a través del propio cable USB conectado al ordenador o mediante una fuente de alimentación externa. Los límites recomendados están entre los 6 y los 12 V.

Para poner en marcha el funcionamiento de arduino uno, se requiere programar la tarjeta, la cual se basa en un lenguaje de programación sencillo, para ello es necesario instalar el software propio de la placa, la plataforma de programación de arduino se llama IDE *Integrated Development Environment* (Entorno de Desarrollo Integrado). La última versión de este software se encuentra disponible en su página web oficial.⁸

5.7 Modificación de Algunos Elementos que Conforman el Radiotelescopio

En esta sección se expone con detalle las modificaciones realizadas a algunos de los componentes básicos del radiotelescopio. cada procedimiento y su correcta modificación es fundamental para el adecuado funcionamiento del instrumento final.

Para los procesos que serán descritos a continuación es recomendable contar con las herramientas suficientes, tanto teóricas como experimentales, con el fin de realizar cada paso de la mejor manera posible, además cada uno puede tomar un determinado tiempo y se debe realizar cuidadosamente, debido a que los elementos utilizados son delicados y difíciles de conseguir.

5.7.1 Modificación del Buscador de Satélites

La señal que registra el buscador de satélites proveniente del LNB llega directamente al galvanómetro que está en el interior de este dispositivo, por ésta razón se requiere

⁸PROGRAMARFACIL Copyright. *Tutoriales introducción Arduino*. Blog Sitio web. 2017.

intervenir el circuito en esa pieza, con el fin de obtener esa señal y llevarla al circuito amplificador, que posteriormente es procesada con la tarjeta Arduino.

Para llevar a cabo este procedimiento, inicialmente se necesita retirar la tapa principal del buscador de satélites, la cual viene sellada con cuatro puntos de soldadura, por lo tanto se debe emplear un cautín⁹ para poder retirarla y tener acceso al interior de dicho dispositivo.



Fig. 5.14: Parte posterior del Sat Finder, tapa Principal



Fig. 5.15: Interior del Sat Finder, cuando se retira la tapa principal.

En el interior del sat finder, se puede apreciar un pequeño dispositivo, que se encuentra pegado a la tapa principal, como se observa en la figura 5.15, el cual permite

⁹Herramienta eléctrica usada para soldar.

escuchar la intensidad de señal que se está captando, llamado **zumbador**¹⁰

Puesto que el sonido es continuo, puede ser molesto para trabajar en la toma de datos, así que el siguiente paso consiste en cortar cuidadosamente los 2 cables del zumbador, negro=tierra y rojo=voltaje para posteriormente alargarlos y colocarle un interruptor que permita controlar este sonido. Figura 5.16



Fig. 5.16: Modificación Sat Finder, donde se coloca el interruptor al zumbador.

Para obtener la señal proveniente del LNB que llega al galvanómetro, se debe soldar un par de cables a la base de esta pieza para interceptar la señal, con el fin de hacerla llegar al circuito amplificador, como se ve en la figura 5.17.

Para suministrar energía al buscador de satélites, se usa una fuente de voltaje de corriente continua (VDC) entre los 13 y 18 Voltios, se pueden colocar 2 pilas cuadradas de 9 Voltios en serie, además adaptarle a este sistema un interruptor que permita controlar el desgaste de esta fuente.

Para este trabajo el diseño realizado consiste en dos pares de pilas, colocadas en paralelo, cada par puesto en serie, dando un voltaje de salida de aproximadamente 18 Voltios, con este diseño se pretende obtener una mayor durabilidad en el funcionamiento de las pilas. También se puede alimentar el buscador satelital con un regulador de voltaje de corriente continua, que tenga una salida de entre 13 y 18 V.

¹⁰Es un transductor electroacústico, es decir que transforma la electricidad en sonido, o viceversa, produce un sonido o zumbido continuo.



Fig. 5.17: Modificación Sat Finder, interceptando señal en la base del galvanómetro.(Positivo = Rojo; Negativo = Negro)

Dado que el Sat Finder tiene una entrada tipo F (Hembra)¹¹ Para conectar el cable coaxial a la fuente, ya sean las pilas o el regulador de voltaje, se requiere adaptar el cable, como se describe a continuación:

- Con ayuda de un bisturí se retira aproximadamente 3 cm de la cubierta protectora de plástico negra. Tener cuidado de no cortar la malla de plata.
- Se enrolla la malla de plata, como si fuese un sólo alambre.
- Posteriormente se retira 1 cm del aislante blanco del cable coaxial, teniendo cuidado de no cortar el núcleo de cobre.
- Conectar la malla enrollada de plata a la terminal negativa de la fuente.
- Conectar el núcleo de cobre a la terminal positiva de la fuente.
- Finalmente, soldar estas conexiones con ayuda de un cautín, para mayor eficiencia del dispositivo, aislar las conexiones con cinta aislante.

En la figura 5.18, se muestra el resultado de la descripción anterior.

Cabe resaltar que todo este proceso se realiza con mucha precaución, usando las herramientas adecuadas. Con éstas modificaciones, el buscador satelital queda listo para transmitir la señal que se desea obtener y que se dirije hacia el circuito amplificador.

 $^{^{11}\}mathrm{Es}$ un tipo de conector para cable coaxial de radiofrecuencia, de uso común en la televisión terrestre por antena aérea, televisión por cable y televisión por satélite. WIKIMEDIA. Conector F, Wikipedia, Fundación Wikimedia, Inc. 2006.



Fig. 5.18: Fuente para el Sat
 Finder con pilas de 9 V cada una, con una salida aproximada de 18 VDC

5.7.2 Circuito Amplificador

El circuito amplificador es el encargado de recibir la señal de voltaje proveniente del buscador de satélites, la amplifica y estabiliza hasta un voltaje adecuado para ser digitalizada. En la figura 5.19 se muestra el esquema del circuito amplificador, donde se usa un amplificador operacional LM741 y demás componentes descritos en la sección anterior.

Al circuito total se lo llama amplificador no inversor, tiene la característica de que la señal que se desea amplificar, se introduce por el terminal no inversor (+), lo cual va a significar que la señal de salida estará en fase (no está invertida) respecto a la señal de entrada y además está amplificada.

Para armar el circuito amplificador, se usa una protoboard llamada *Prototyping Shield* de referencia *DFR0019* como se ve en la figura 5.20, la cual permite crear cualquier tipo de circuito sobre ella, para este trabajo se hace con fin de conectar el micro controlador Arduino Uno R3. Los componentes se pueden soldar directamente en esta placa. Se recomienda la experiencia previa de soldadura.

Se sugiere también, construir primero el circuito amplificador en una protoboard normal, para luego poder ensamblar los componentes de manera segura en la protoshield DFR0019, como se muestra en la imagen 5.21 con el fin de no dañar la placa donde va a quedar el circuito final.



Fig. 5.19: Esquema del Circuito Amplificador, en la parte superior izquierda se tiene el esquema del AO LM741.



Fig. 5.20: Protoboard compatible con arduino, referencia DFR0019.

Posteriormente el circuito se construye en la placa protoboard compatible con arduino, el pin 6 es la salida, que debe ir conectado con la entrada analógica A0 de la placa arduino. En la figura 5.22 se muestra el circuito amplificador terminado y en la figura 5.23, se indica el circuito amplificador acoplado con la tarjeta arduino.



Fig. 5.21: Circuito amplificador en una protoboard normal, como primera prueba.



Fig. 5.22: Circuito Amplificador construido en la protoshield compatible con Arduino.

El circuito se alimenta con una fuente de 9 Voltios, para ello se usa una configuración de 2 pilas cuadradas con esa salida de voltaje, para su mejor rendimiento, además se pueden adaptar unos interruptores para apagarlas cuando no están en uso y de esta manera sean más eficientes. Para que el amplificador, haga su función se necesita polarizarlo, es decir, colocarle con ayuda de las pilas de 9V, el voltaje positivo, negativo y tierra correspondientemente, ver figura 5.24.



Fig. 5.23: Circuito amplificador listo para ser acoplado con la tarjeta arduino.



Fig. 5.24: Fuente del circuito amplificador.

5.7.3 Instalación Tarjeta Arduino Uno R3

Una vez se han modificado los componentes mencionados anteriormente, se procede a la instalación de la tarjeta arduino. Para almacenar los datos de una señal analógica se requiere digitalizarlos para analizar e interpretar sus valores como ya se indicó en la sección de referencias de los elementos de eso se encarga dicha tarjeta. La finalidad es que al tener los datos de la señal proveniente del Sol se pueda leer y guardar la información para realizar el posterior análisis de los mismos.

Es necesario programar la tarjeta Arduino, usando un código fuente ya sea el proporcionado por la misma tarjeta, en este proyecto en particular, se usa un código fuente escrito en Python, cuyas características se describen más adelante.

Pasos para la Instalación de la Tarjeta Arduino Uno R3

- Tener la placa Arduino y el cable USB adecuado.
- Descargar el ambiente de desarrollo Arduino IDE.
- Instalar los drivers USB de la computadora.
- Conectar la tarjeta Arduino.
- Ejecutar el ambiente de desarrollo Arduino.
- Cargar el programa en la tarjeta.
- Aprender a usar Arduino.

Para llevar a cabo este proceso, se debe tener la placa Arduino y un cable USB de conexión tipo A – B (similares a los que se usan para conectar impresoras) para conectar la placa con el ordenador. Luego se debe descargar el software de reconocimiento de la tarjeta, para que la tarjeta sea reconocida por el ordenador, esto se puede realizar desde la página oficial de Arduino, el cual que es de libre adquisición.

La instalación y funcionamiento de Arduino IDE para este trabajo se desarrolla en el sistema operativo (S.O) Linux, para este caso se realiza la instalación en (S.O) Ubuntu 16.04 LTS, aunque se necesita realizar la configuración y puede que tal instalación no sea adecuada para alguien que no haya manejado antes este tipo de S.O, pero en internet se pueden encontrar muchos tutoriales con distintas formas de como realizar la instalación, a continuación se describen los pasos para una instalación de manera sencilla, usando la terminal de Ubuntu.

Desde la Terminal de Ubuntu, se puede iniciar la descarga, digitando el siguiente código de instalación:

sudo apt-get install arduino arduino-core

Se debe esperar el tiempo necesario mientras se descargan todos los paquetes, la versión instalada en este caso es *Arduino 2:1.0.5*. Una vez instalados, se debe verificar si la conexión entre el programa y la placa está funcionando, es decir que el ordenador la esté reconociendo. Para ello se conecta la placa al ordenador y en la terminal se escribe lo siguiente:

```
dmesg | grep ttyACM
```

Si la conexión está funcionando correctamente, la terminal devuelve una frase que termina con lo siguiente:

```
ttyACMO: USB ACM device
```

Esto indica que la conexión está lista. Sin embargo, para que se pueda insertar y enviar los programas a la placa, es necesario dar permisos al puerto, esto se hace escribiendo en la terminal:

```
sudo chmod 666 /dev/ttyACMO
```

Configuración de Arduino IDE

Cuando se ha realizado cada uno de los pasos anteriores, iniciamos Arduino desde el menú de aplicaciones o desde la terminal escribiendo Arduino para configurar la placa, para ello en la plataforma que se despliega en el menú *Herramientas*, se selecciona la tarjeta con la que se va a trabajar, es decir en este caso, Arduino Uno, figura 5.25.



Fig. 5.25: Plataforma del software de Arduino para seleccionar el tipo de tarjeta

Lo siguiente es seleccionar el puerto por el cual se comunica la tarjeta, en el menú *Herramientas/ Puerto Serial/ttyACM0*, figura 5.26. Es necesario siempre que se inicie, realizar esta última operación para tener la seguridad que está en el puerto correcto.¹²



Fig. 5.26: Selección del puerto en Arduino

Cuando se tiene instalada la plataforma, para poner en funcionamiento la tarjeta arduino se requiere un código fuente, el cual se escribe directamente sobre el editor de texto y luego se carga sobre la placa. Sin embargo se pueden usar otros lenguajes de programación, que también sean compatibles con la tarjeta.

Para este trabajo se usa otro lenguaje de programación, que cuenta con estructuras de datos eficientes, de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos, llamado *Python*. La elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hacen de este un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas, donde destaca por la facilidad para comunicar con diferentes dispositivos (ordenadores, tablet, tarjetas) dado que la programación en el lenguaje de Python resulta ser muy versátil, la conexión con Arduino se puede realizar empleando el puerto serie y algunas librerías como la librería $PySerial.^{13}$

¹²GARCÍA, Joaquín. Instala Arduino IDE. Ubuntu para tus Proyectos con Arduino. 2015.

¹³VAN ROSSUM, Guido, DRAKE, Fred L. *Tutorial de Python*. Copyright Python Software Foundation. 2009.

5.7.4 Arduino Uno con Python

En esta sección, se describe como conectar la tarjeta Arduino con el lenguaje de programación Python y la librería PySerial¹⁴. Para desarrollar esta tarea, lo primero es tener instalado Python en el ordenador. Hay muchas formas en las que se puede instalar este lenguaje de programación, una de las más sencillas y fáciles de usar es la distribución gratuita llamada Anaconda¹⁵ que es la versión usada en este trabajo, se caracteriza por ser de desarrollo libre e instala los paquetes más importantes para tratamiento de grandes volúmenes de datos, cálculos científicos y análisis de predicciones, todo en un mismo paquete.

La instalación de esta distribución de python se puede realizar de manera simple, primero se descarga el paquete desde la página oficial del software ¹⁶ para este caso se usa la versión para *Python 2.7* ¹⁷ una vez descargado, desde la terminal de Linux se ejecuta el comando que inicia la instalación:

bash Anaconda-2.x.x-Linux-x86[_64].sh

Después se aceptan los términos de licencia y se especifica la ubicación de instalación. Anaconda por defecto trae incluidos varias interfaces como editores de texto, donde se escriben directamente los programas que se desean ejecutar. Para este caso se utiliza la interfaz llamada $Spyder^{18}$ que soporta Python 2.7.¹⁹

Una vez instalado el editor de Python, Spyder, se requiere la comunicación con la placa Arduino, para ello se necesita la librería PySerial, la cual permite emplear de forma sencilla el puerto serie²⁰.

Se descarga la librería PySerial, la cual está disponible en este enlace *https://github.com/pyserial/pyserial* y se ejecuta el instalador, para añadir la librería PySerial a la instalación de Python. Finalmente se tiene la librería PySerial instalada y lista para ser utilizada, en la conexión con arduino.

¹⁴Entre las muchas librerías de Python se encuentra una específica que provee la capacidad de utilizar muy fácilmente los puertos seriales de una computadora para comunicarse con otros dispositivos. Esta biblioteca fue creada por Chris Liechti. WIKISPACES. *Módulo PySerial*. Blog sitio Web Pyserialuvg. 2017.

¹⁵Es una distribución de Python multiplataforma, desarrollada por Continuum Analytics. Contiene una gran colección de paquetes y librerías para análisis de datos, computación científica e ingeniería ¹⁶ANACONDA. Anaconda. Distribución Libre Web Oficial. 2017.

¹⁷PYTHON 2.7.12. Default, Nov 19 2016, 06:48:10 [GCC 5.4.0 20160609] on linux2. 2017.

¹⁸Es un entorno de desarrollo interactivo de Python que proporciona características similares a MATLAB en un software simple y ligero. También proporciona widgets Python listos para usar en su aplicación PyQt5 o PyQt4: editor de código fuente con resaltado de sintaxis y funciones de introspección / análisis de código, editor de matriz NumPy, editor de diccionario, consola Python, etc.

¹⁹SPYDER Project Contributors. *Scientific Python Development Environment SPYDER*. Python Software Foundation. 2017.

²⁰Es el nombre genérico con que se denomina a interfaces, físicos o virtuales, que permiten la comunicación entre dos ordenadores o dispositivos.

Realizado este procedimiento, se puede comenzar a generar un código fuente, de tal manera que lea el puerto serial de la tarjeta arduino, por donde se transmite la señal que se desea almacenar. Para este proyecto, el código desarrollado para almacenar datos desde una tarjeta arduino, escrito en lenguaje de python, ha sido facilitado por *Rodolfo Escobar* de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y ha sido modificado para los requerimientos propios de este proyecto.

Para entender a grandes rasgos el código, se hace una descripción de las librerías utilizadas:

1. import serial #

• Importa la librería PySerial, la cual comunica python con Arduino.

2. import time #

• Importa la librería Time, la cual define un tipo especial de variable para almacenar valores de tiempo en un formato especial.

import datetime #

• Importa la librería datetime, la cual agrega capacidad de reloj a Arduino, sin necesidad de hardware externo. Permite que un archivo obtenga el registro de segundos, minutos, hora, día, mes y año actuales.

4. import numpy as np #

• Importa la librería numpy, la cual se encarga de añadir toda la capacidad matemática y vectorial a Python, haciendo posible operar con cualquier dato numérico.

NOTA IMPORTANTE

- Para leer el puerto serial de la tarjeta arduino, se debe tener en cuenta el nombre con el que está reconocido por el ordenador, puesto que debe ir incluido en el programa a ejecutar. En este caso, el ordenador ha reconocido el puerto con el nombre de «*ttyACM0*» si el programa se ejecuta en el sistema operativo Linux, o «*COM8*» si el programa se ejecuta en windows.
- Al ejecutar el programa en el S.O Linux, se usa únicamente la siguiente línea de código y se desactiva la siguiente línea con el símbolo numeral #

Ard = serial.Serial('/dev/ttyACM0',9600,timeout=1.0)

• Por el contrario, si se ejecuta el programa en S.O Windows se deja la siguiente línea y se desactiva la anterior.

```
Ard = serial.Serial('COM8',9600,timeout=1.0)
```

A continuación, se indica el código fuente escrito en lenguaje de python, con las librerías mencionadas anteriormente, las cuales permiten controlar la tarjeta arduino uno R3 con python. Lo que hace el programa, es crear un archivo de texto, automáticamente desde que comienza su ejecución y guarda el archivo en formato .txt, con un nombre igual a la fecha y hora actuales.

El código está diseñado para realizar la lectura de los datos y hacer el registro cada segundo, hasta que se detiene el programa, lo cual se puede hacer manualmente con CTRL + C, el archivo de este programa se puede guardar en una carpeta cualquiera, donde se almacenaran también los archivos de texto del registro de la señal del radiotelescopio, además tiene como formato la extensión **.py**, que sólo es ejecutable con python.

```
import serial
import time
import datetime
import numpy as np
Ard = serial.Serial('/dev/ttyACMO',9600,timeout=1.0)
#Ard = serial.Serial('COM5',9600,timeout=1.0)
#Preparar Archivo
now = datetime.datetime.now()
name = unicode(now.replace(microsecond=0))
name = name.replace(":","-")
f = open(name+".txt",'w+')
strt = time.time()
Ard.flushInput()
while (1):
    # Se hace una solicitud de lectura al arduno cada segundo.
    if (time.time()-strt < 1):</pre>
        buf = []
        for i in range(0,6):
               try :
                 #lectura Arduino, puerto serial.
                 buf.append(np.float(Ard.readline()))
               except ValueError:
                    buf.append(0)
                #Ard.write(('v').encode())
```

```
Vrd = np.median(buf)
#Cadena de fecha
now = datetime.datetime.now()
dt = unicode(now.replace(microsecond=0))
#escribir archivo
f.write(str(Vrd)+','+dt)
f.write("\n")
strt = time.time()
print Vrd,', ',dt
```

5.8 Ensamble del Radiotelescopio

Una vez realizada la modificación de los elementos básicos, que componen el radiotelescopio, se comienza el proceso de ensamblaje de todas las piezas. En esta sección se indica como se desarrolla el proceso para acoplar cada uno de los componentes y finalmente del conjunto en general.

5.8.1 Armado de la Antena Parabólica Offset

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, la antena es una parte fundamental para un radiotelescopio. Para armar una antena parabólica offset, se requieren herramientas sencillas, como alicates, o una llave inglesa que dispone de un mecanismo que permite adaptarla a tuercas de diferentes medidas, a continuación en la figura 5.27 se muestra un esquema de las piezas de una antena de este tipo.



Fig. 5.27: Partes de una antena parabólica offset. Dominio público, Wikimedia Commons.

5.8.2 Acople de los demás Componentes

Con la antena lista, se realiza el acople del resto de componentes del radiotelescopio, siguiendo un proceso similar al descrito a continuación:

- Se realiza la conexión de la antena parabólica completa con su LNB incluido, con el buscador de satélites, mediante cable coaxial RG-6. El buscador de satélites debe estar conectado con su fuente de voltaje respectiva.
- Luego se hace el acople de las terminales de salida de señal provenientes del buscador de satélites, con las entradas en el circuito amplificador, en la protoboard compatible con arduino.
- Se sigue con la conexión de la fuente de voltaje de 9 V, a los pines de entrada que se encuentran en la protoboard y que alimentan al circuito amplificador.
- La placa del circuito amplificador se ensambla con la tarjeta arduino uno R3, de tal manera que coincidan los pines de ambas.
- Se realiza la conexión de la tarjeta arduino con el ordenador, mediante el cable USB.

Con todas las piezas conectadas, se tiene el radiotelescopio completo, figura 5.28, para una primera prueba de su funcionamiento. Para ello de debe colocar el instrumento en un lugar al aire libre, con el fin de realizar el apuntado de la antena al objeto que se desea estudiar, en este caso el Sol.

Para apuntar el radiotelescopio, simplemente se debe seguir la dirección del eje metálico que sujeta al LNB, de tal forma que apunte directamente al cuerpo que se desea estudiar, también se puede observar la sombra del LNB sobre la base inferior del plato colector. Por lo tanto cuando se tiene direccionado el instrumento se procede a realizar la toma de datos.

Para ello se debe tener preparado el ordenador, con el programa de adquisición de datos listo para ser ejecutado. Se carga el programa en el editor de entorno de desarrollo de Python, es decir *Spyder*, teniendo en cuenta que la carpeta donde éste se encuentra guardado, es la misma se van a almacenar los archivos que contienen los datos que se están registrando, por ello se recomienda tener el archivo del programa en una carpeta ya identificada.

En la interfaz de Spyder como se indica en la figura 5.29, con el archivo del programa cargado, se da en la opción *ejecutar archivo*, que se encuentra en la parte superior izquierda de la ventana, representado con un ícono de color verde en forma de punta de flecha, o simplemente se teclea F5.



Fig. 5.28: Radiotelescopio completamente armado.

Cuando el programa está en marcha y si no detecta ningún error (indica que todo está bien conectado), se puede observar en la parte inferior derecha una terminal de python donde se comienzan a desplegar los datos de la señal que se está registrando. Una vez se inicia el registro de la señal, se debe esperar el tiempo necesario que se desee, para el almacenamiento de datos.

(Python 2.7)						
	I C X	2) +	+ /home	rtesla		+
Editor - /home/tesla/Documentos/Tesis/Datos RTC/Arduino.py	B Explorador	de variables				18 8
Arduino.py 🗱	Nombre	+ Tipo	Tamáño	Valor	A	-
8 import serial	- Vrd	float64	1	0.86499999999999999		3
S import time 10 import datetime	buf	list	3	[0.86, 0.87, 0.88]		4
11 import numpy as np	dt	unicode	1	2017-10-10 12:17:45		14
13 //	1	int	i	3		н
	name	unicoda	4	2017-10-10 12-16-45		12
17 aacd = arrial Serial ("2015", ands, rimesurvist)	Inspector	de objetos	Explorador d	e variables Explorador de archivos		1.154
19 Abrayur in Arabi va				- Content of the content of		
<pre>20 now = datetime.datetime.now() 21 name = unicode(now.replace(microsecond=0))</pre>	Terminal de	Python				10 8
22 name = name.replace(":", ")	Ter Ter	minal 1/A 3	¢			$\Xi_{\rm F}$
<pre>33 str = time.time() 31 str = time.time() 32 str = time.time() 33 str = time.time() 34 str = time.time() 35 str = time.time() 36 str = time.time() 37 str = time.time() 38 str = time.time() 39 str = time() 39 str = time() 30 str = time() 30 str = time() 31 str = time() 32 str = time() 33 str = time() 34 str = time() 35 str = tim</pre>	Type "copy lfython 2. 2 couries of the object? in [1]: ru wdf:=//hou 0.55 . 20 0.88 . 20 0.88 . 20 0.87 . 20 0.88 . 20 0.87 . 20 0.88 . 20 0.87 . 20 0.86 . 2 0.66 . 2 0.86 . 2	4.1 An e -> Introduc -> Outck re -> Outch re -> O	<pre>cellts or 'L nhanced Inte tion and ove ference. own help sy e/tesla/Docu umentos/Tesl 13:05 133:15 133:12 133:13 133:27 133:13 133:13 133:45 133:57 134:05 144:05</pre>	<pre>idense for more information. ractive Python. ractive Python's features. stem. stem. t'. use 'object??' for extra detail out the graphical user interface. nemtes/fest/pations RIC/Arduino.py', s/Datos RTC')</pre>		

Fig. 5.29: Interfaz del programa Spyder, editor de lenguaje de programación python.

Capítulo 6 Caracterización del Radiotelescopio

En este capítulo se hace referencia a las pruebas y caracterización del radiotelescopio, que tienen como finalidad principal comprobar el funcionamiento del diseño realizado, de manera que se pueda obtener algunos parámetros básicos, tales como el tamaño del haz primario y los niveles de los lóbulos secundarios. Para efectuar las pruebas y caracterización se usan los datos obtenidos de las observaciones del Sol.

El diseño del radiotelescopio de 83 cm de este trabajo tiene una montura llamada alt-azimutal¹, la cual realiza movimientos horizontales y verticales, al movimiento en el plano horizontal se le llama «azimut», y se mide en grados desde 0° para el Norte hasta 360°. Al movimiento vertical se le llama «altura» o «elevación» medida entre 0° para el horizonte a 90° en el cenit. Para tomar los datos con este sistema se ajusta la elevación y el azimut de acuerdo al objeto que se desea estudiar de tal forma que el astro de interés deriva justo enfrente de la antena, también se puede tener una idea al apuntar el instrumento observando la sombra que hace el LNB en la base del plato reflector.

La longitud de onda λ detectada por el radiotelescopio construido en este trabajo está en el rango de 0.0280 m y 0.0235 m, que es el intervalo en el que trabaja el **LNB** como se mencionó en las especificaciones en la sección 5.3.2 puesto que el rango de frecuencias detectado es de 10.700 GHz a 12.750 GHz. Se tiene un valor de frecuencia central de 11.700 GHz, para el cual la longitud de onda es de 0,0256 m, valor que usaremos para los cálculos teóricos de los parámetros básicos del dispositivo.

 $^{^{1}}$ O simplemente montura altazimutal, es el soporte usado para mover un telescopio o radiotelescopio a lo largo de dos ejes perpendiculares de movimiento *horizontal* y *vertical*, que son medidos en relación al observador y se denominan *azimut* y *altura*.

6.1 Forma esperada para el haz observado

Para una antena ideal el patrón de recepción del alimentador es uniforme dentro del diámetro de la antena y cero fuera de él. En la práctica eso no ocurre de esta manera, sino que se puede tener el caso cuando se capta la radiación sobre todo el diámetro más la radiación proveniente de atrás de la antena, es decir, se agrega ruido al sistema, pero se aprovecha toda la superficie de la antena. Alternativamente, se puede tener el caso cuando sólo se recibe radiación sobre un área menor del diámetro del plato, en tal caso no se aprovecha al máximo la apertura de la antena, pero no se inserta ruido adicional. Para el primer caso, el patrón de sensitividad de la antena se aproxima a una función $E(\phi)$ (ecuación 4.8) dada por el principio de Huygens, como se mencionó en el capítulo 4 y tiene la forma de la gráfica 6.1 para características similares a nuestra antena:

$$E(\phi) = \frac{2\lambda}{\pi D} \frac{J_1\left[\frac{\pi D}{\lambda}\sin\phi\right]}{\sin\phi},$$

donde J_1 , es una función de Bessel de primer orden. D = 0.830 m, es el diámetro de la apertura de la antena. $\lambda = 0.026$ m, es la longitud de onda en el espacio libre.



Fig. 6.1: Patrón teórico de radiación para una apertura circular con una iluminación uniforme. Imagen tomada de MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE UN RADIOTELESCOPIO EN LA BANDA DE 12GHZ PARA USOS DOCENTES - INAOE

6.2 Cálculos teóricos de los parámetros del radiotelescopio

Se procede a realizar los cálculos teóricos de los parámetros del radiotelescopio de 83 cm de diámetro, teniendo en cuenta los conceptos explicados en el capítulo 4 y usando las respectivas herramientas matemáticas, como se muestra en esta sección.

El primer nulo del patrón de radiación es el *ancho del lóbulo principal*, físicamente este parámetro se conoce como la resolución angular de la antena, como se explicó en la sección 4.3.3 con la ecuación 4.14, el cálculo para este caso se muestra a continuación:

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} = 0.038$$
 rad.

Por tanto, haciendo la conversión a grados en este caso la resolución angular es de:

$$\theta = 2.180^{\circ}.$$

Para el BWFN (Beam width between first nulls), que es el ancho del haz entre los primeros nulos ecuación 4.12 se tiene:

$$BWFN = \frac{140}{D_{\lambda}} = 4.385^{\circ}.$$

El ancho del haz a potencia media FWHM, se obtiene mediante la ecuación 4.13:

$$FWHM = \frac{58}{D_{\lambda}} = 1.817^{\circ}.$$

La directividad Đ de una apertura circular iluminada uniformemente como se vio en la sección 4.3.6 se obtiene con la relación 4.26.

$$\mathbf{D} = 9.87 D_{\lambda}^2 = 10058.348,$$

para el resultado final la directividad se expresa en unidades llamadas decibeles isotrópicos (dBi) como se indicó con la ecuación 4.27 así:

$$D_{dBi} = 10 \log_{10} D = 40 \text{ dBi}.$$

La ganancia de la antena se determina usando la ecuación 4.30, se obtiene la ganancia en decibeles (dBi) de la misma forma que se hizo para la directividad:

$$G = 6D_{\lambda}^2 = 38 \text{ dBi.}$$

La eficiencia de la antena no es del 100%, entonces la ganancia debe ser menor que la directividad, y se tiene que por la relación 4.28, podemos calcular el valor del factor de eficiencia k.
$G = k \mathbb{D},$

En este caso realizando el cálculo con los valores de G y Ð, sin la conversión a dBi, se tiene:

$$k = G/D = 6114.450/10058.348 = 0.6.$$

Este resultado hace referencia a la eficiencia de la antena que se había mostrado como η en la sección 4.3.5, de manera que se tiene una eficiencia de la antena del 60%.

$$\eta = 60\%.$$

6.3 Cálculos experimentales de los parámetros del radiotelescopio

Como se mencionó en la sección 5.7.4, el programa realizado en python almacena los datos de la señal registrada del Sol en un archivo de texto que se guarda en la misma carpeta donde se tiene dicho código, los datos corresponden a la potencia que registra el receptor, la cual está en unidades de decibeles (dB) en función del tiempo local en unidades de horas, minutos y segundos.

Al graficar los datos registrados se espera que la señal muestre un pico máximo, que es la forma del haz esperado como se indicó en la figura 6.1, la potencia de la señal debe ir subiendo a medida que el cuerpo que se está estudiando pasa justo por el frente de la antena, llega a un máximo cuando pasa por el centro de la misma y va disminuyendo a medida que sale de ésta.

6.3.1 Análisis de datos del 17 de diciembre de 2017

En la figura 6.2 se muestra la gráfica de los datos registrados el 17 de diciembre de 2017, en un intervalo de tiempo desde las 12h:58m:38s hasta las 13h:41m:29s UTC², es decir las 07h:58m:38s hasta las 08:41m:29s hora local en San Juan de Pasto, estos datos serán los que usaremos para realizar el cálculo de los parámetros del radiotelescopio y de esta manera demostrar su eficiencia.

El radiotelescopio fue apuntado en dirección SE (sur - este), para el inicio y final del tránsito del Sol usando las coordenadas de azimut y altura como se muestran en la tabla 6.1.

²Universal Time Coordinated, *Tiempo Universal Coordinado* equivalente a la hora en el meridiano de Greenwich (GMT) y que se utiliza como referencia de la hora internacional

Latitud del Lugar	Longitud del Lugar	Azimut	Altura (elevación)
1.2°N	-77.3° W	116.7°	25.6°

Tabla 6.1: Coordenadas 17/12/2017 12h:58m:38s UTC.



Fig. 6.2: Potencia registrada de la señal del Sol en decibeles (dB), en función del tiempo hora local 17/12/2017.

Dado que la potencia está en d B se debe convertir a miliWatt
s (mW) con el fin de encontrar los resultados que permitan hacer la caracterización del instrumento, esto se hace mediante la ecuación
 $6.1.^3$

$$P(\mathrm{mW}) = 1\mathrm{mW} \ 10^{(\mathrm{x}/10)}. \tag{6.1}$$

donde P es la potencia en mW y x es el nivel de potencia en dB.

También es necesario hacer la conversión del paso de tiempo a grados mediante la relación que hay entre estas magnitudes, así:

Si el Sol recorre 15° en 60 minutos, en 0.5 min = 30 segundos se mueve 0.125° .

En la figura 6.3 se muestra la gráfica con los datos de potencia y tiempo convertidos a miliWatts y ángulo en grados (°) respectivamente.

³ BIGELOW, Stephen. Understanding Telephone Electronics. Newnes. p.16.



Fig. 6.3: Potencia de la señal registrada del Sol en miliWatts, en función del ángulo en grados.

Los espectros de potencia del receptor tienen cierto nivel de ruido, por lo cual se debe tener en cuenta este valor con el fin de normalizar los datos para luego realizar el cálculo de los parámetros del instrumento, para hacer esto se localizan los datos del ruido que corresponden a los datos registrados cuando el radiotelescopio no está apuntando directamente al Sol, se promedian dichos datos para luego extraer ese nivel a los espectros del receptor.

Una vez se tienen todos los espectros corregidos por ruido se procede a normalizar la potencia, lo que se ha hecho es tomar el nivel de ruido calculado y se ha restado con cada dato de la potencia registrada; luego se busca el valor de la potencia más alta, con el fin de dividir el espectro de potencias sin ruido entre el valor máximo de potencia, finalmente con este proceso se tiene el espectro de potencia normalizado.

Cuando se tiene normalizado el espectro de potencias se procede a ajustar una gaussiana al pico mas grande que correspondería al beam principal de la antena. El ajuste se puede hacer con cualquier programa de análisis de datos, en este caso se realizó un script para ser ejecutado con el programa $Gnuplot^4$, el cual realiza el ajuste de los datos con una función una gaussiana y arroja los valores de la desviación estándar sigma σ , y chi cuadrado reducido χ^2/doF , que se define como el valor del chi cuadrado dividido entre los grados de libertad.

En la figura 6.4 se indica la gráfica con el ajuste gaussiano y en la tabla 6.2 se indican los valores de salida de dicho ajuste.

⁴Programa bajo licencia de software libre, usado para generar gráficas de funciones y datos.



Fig. 6.4: Ajuste de la gaussiana al patrón de potencia normalizado.

m 11 co	D_{1} 1/1	1 1	• ,	•
Tabla 6.2	Resultados	del	9111STP	oguissiano.
10010 0.2.	resultados	uur	ajusic	gaussiano

σ (°)	χ^2/doF
0.915 ± 0.008	0.002

Con los datos encontrados a partir del ajuste gaussiano se procede a realizar los cálculos de los parámetros del instrumento mediante algunas relaciones que ya se mostraron en el capítulo 4.

De esta manera haciendo referencia a la ecuación 4.6 de la sección 4.3.2, la cual indica la relación que hay entre el FWHM (Full Width Half Maximum) de una distribución gaussiana y la desviación estándar, así:

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \ \sigma = 2.155^{\circ},$$

donde se ha obtenido un resultado para el FWHM de 2.155°, como se mencionó en la sección 4.3.3, este valor se puede tomar como la resolución de la antena por ajustarse a una gaussiana, por lo tanto la resolución experimental para el radiotelescopio es:

$$\theta = 2.155^{\circ}.$$

Como se indicó en la sección 4.3.2 la ecuación 4.7 muestra que el ancho entre los primeros nulos (BWFN) es el doble del ángulo de la resolución de la antena, por lo tanto se tiene un valor de BWFN:

$BWFN = 2FWHM = 2\theta = 4.310^{\circ},$

También es posible calcular la eficiencia de la antena η en términos del ángulo sólido, puesto que está definida como el cociente entre ángulo sólido del haz principal Ω_M y el ángulo sólido del haz total Ω_A , ecuación 4.19.

Para encontrar el área del haz o ángulo sólido total de la antena Ω_A , el cual se define como la integral sobre todas las direcciones del diagrama del haz del patrón de potencia normalizado ecuación 4.15, se debe integrar el espectro de las potencias en toda la observación. El resultado de la integral sobre el espectro normalizado tomando en cuenta los lóbulos secundarios:

$$\Omega_A = 2.150^{\circ^2}$$

El ángulo sólido del haz principal Ω_M es el área del beam principal sin tomar en cuenta la contribución de los lóbulos secundarios, para hallarlo se integra el espectro sólo debajo del pico principal y se obtiene el valor:

$$\Omega_M = 1.265^{\circ^2}$$

por lo tanto el valor de η para el radiotelescopio es de 0.588, de manera que se ha obtenido una eficiencia:

$$\eta = 59\%$$

Para realizar el cálculo del FWHM con el valor del área del ángulo sólido total Ω_A , se debe tener en cuenta que para una apertura circular $\Omega_A = (BWFN/2)^2 = FWHM^2$, como se mostró en la ecuación 4.18, por lo tanto.

$$FWHM = \sqrt{\Omega_A} = 1.466^\circ$$

Como se explicó en la sección 4.3.6, para calcular la directividad de la antena Đ, la cual se define como la razón entre el ángulo sólido de una esfera (4sr) y el ángulo sólido del haz de la antena Ω_A , se aplica la ecuación 4.24. Se toma en cuenta la integral sobre toda la esfera del espectro tomando en cuenta la contribución de los lóbulos secundarios.

Puesto que las magnitudes están siendo calculadas en unidades de grados, se debe convertir 4π sr a grados cuadrados, sabiendo que un estereorradián (sr) equivale a $(180/\pi)^2$ grados cuadrados, se obtiene:

$$4\pi \ sr = 4\pi (180/\pi)^2 = 41253^{\circ^2},$$

la directividad D será $D = \frac{41253^{\circ^2}}{2.150^{\circ^2}} = 19187.442,$

La directividad generalmente se expresa en dBi (decibeles isotrópicos) por lo tanto se emplea la conversión mencionada en la ecuación 4.27 así:

$$\mathcal{D}_{dBi} = 10 \log_{10} \mathcal{D} = 42 \, \mathrm{dBi}$$

Ahora, para calcular la ganancia de la antena G, la cual está relacionada con la directividad Đ, y el factor de eficiencia de la antena k, como se mostró en la sección 4.3.7, ecuación 4.28, se tiene en cuenta que el factor de eficiencia está dado por la eficiencia η ya calculada.

$$G = k \mathbf{D} = (0.588)(19187.442) = 11282.216.$$

nuevamente la ganancia se expresa en unidades dBi, realizando la conversión como se hizo anteriormente para la directividad.

$$G = 40 \text{ dBi}.$$

A continuación, en la tabla 6.3 se muestran los valores obtenidos tanto teóricos como experimentales de los parámetros de caracterización del radiotelescopio con su respectivo error relativo porcentual.

Tabla 6.3: Resultados teóricos y experimentales de los parámetros del radiotelescopio con su respectivo error relativo porcentual para los datos del 17/12/2017.

Parámetros	$oldsymbol{ heta}$ (°)	$\mathbf{BWFN}(^{\circ})$	FWHM $(^{\circ})$	Ð (dBi)	\mathbf{G} (dBi)
Resultados Teóricos	2.180	4.385	1.817	40	38
Resultados Experimentales	2.155	4.310	1.466	42	40
Error Relativo %	1%	2%	19%	5%	5%

6.3.2 Análisis de datos del 23 de Febrero de 2018

En la figura 6.5 se muestra la gráfica de los datos registrados el 23 de febrero de 2018, en un intervalo de tiempo desde las 15h:40m:00s hasta las 17h:10m:55s UTC, es decir las 10h:40m:00s hasta las 12h:10m:55s hora local en San Juan de Pasto, con estos datos también se realizan los cálculos de los parámetros del radiotelescopio de manera similar a como se indicó anteriormente, por lo tanto se muestran únicamente los resultados obtenidos a partir de su análisis. En la tabla 6.4 se indican las coordenadas del Sol, azimut y altura para esta fecha.



Tabla 6.4: Coordenadas 23/02/2018 14h:46m:38s UTC.

Fig. 6.5: Potencia registrada de la señal del Sol en decibeles (dB), en función del tiempo hora local 23/02/2018.

Se convierte la potencia de decibeles (dB) a miliWatts (mW) mediante la ecuación 6.1 y se realiza la conversión del paso de tiempo a grados, obteniendo así la gráfica 6.6.



Fig. 6.6: Potencia de la señal registrada del Sol en miliWatts, en función del ángulo en grados.

Se realiza la normalización el espectro de potencias, siguiendo el mismo procedimiento que se hizo para los datos analizados anteriormente. Luego se hace el ajuste de la función gaussiana al pico mayor que corresponde al beam principal, como se muestra en la gráfica 6.7



Fig. 6.7: Ajuste de la gaussiana al patrón de potencia normalizado.

Los valores de la desviación estándar sigma σ , y chi cuadrado reducido χ^2/doF obtenidos a partir del ajuste gaussiano se muestran en la siguiente tabla 6.5.

Tabla 0.9. Resultados del ajuste gaussiano	Tabla	6.5:	Resultados	del	ajuste	gaussianc
--	-------	------	------------	-----	--------	-----------

σ (°)	χ^2/doF		
1.050 ± 0.009	0.013		

Con los valores encontrados a partir del ajuste gaussiano se procede a realizar los cálculos de los parámetros del instrumento como se indicó en el anterior análisis, a continuación se muestran únicamente los más relevantes y en la tabla 6.6 se adjuntan todos los resultados obtenidos.

La integral sobre el espectro normalizado tomando en cuenta los lóbulos secundarios, es decir el área del haz o ángulo sólido total de la antena Ω_A tiene un valor de:

$$\Omega_A = 3.787^{\circ^2}$$

El área del beam principal sin tomar en cuenta la contribución de los lóbulos secundarios, es decir el ángulo sólido del haz principal Ω_M es:

$$\Omega_M = 2.527^{\circ^2}$$

Por lo tanto el valor de η para este caso es de 0.667, de manera que se ha obtenido una eficiencia de $\eta = 66\%$

El resultado del FWHM usando el valor del área del ángulo sólido total Ω_A es de:

$$FWHM = 1.946^{\circ}$$

A continuación, en la tabla 6.6 se muestran los valores obtenidos tanto teóricos como experimentales de los parámetros de caracterización del radiotelescopio con su respectivo error relativo porcentual para este caso.

Tabla 6.6: Resultados teóricos y experimentales de los parámetros del radiotelescopio con su respectivo error relativo porcentual para los datos del 23/02/2018.

Parámetros	$\boldsymbol{ heta}$ (°)	$\mathbf{BWFN}(^{\circ})$	$\mathbf{FWHM} \ (^{\circ})$	Ð (dBi)	\mathbf{G} (dBi)
Resultados Teóricos	2.180	4.385	1.817	40	38
Resultados Experimentales	2.472	4.945	1.946	40.4	38.6
Error Relativo %	13%	12%	7 %	1 %	2 %

A partir del análisis de los datos se puede observar que los resultados obtenidos de los valores calculados para la caracterización del radiotelescopio tanto del 17/12/2017 como los del 23/02/2018 tienen concordancia con los valores esperados para cada parámetro de la antena, por lo tanto, nos demuestra la funcionalidad del instrumento.

NOTA:

El error relativo porcentual para los parámetros del FWHM del 17/12/2017, de θ y el BWFN del 23/02/2018 corresponden a valores de error relativo grandes y se debe principalmente a que falta hacer un mejor procesado de la señal. El procesado de señales es una técnica en electrónica que requiere de práctica. Consiste en sustraer «ruido» de diferentes fuentes como: interferencia, voltajes residuales (bias), derivas del detector (linea base), alineación del alimentador (LNB), etc.

Para mejorar los resultados, se debe sustraer el voltaje residual ajustando un polinomio de grado uno o dos a los datos sin la zona de detección. Después hay que sustraer un voltaje residual para ponerlo en cero la linea base y finalmente hacer el ajuste solo a datos que están a no mas dos FWHM de la detección.

Conclusiones

- La radioastronomía en la actualidad es una de las principales técnicas utilizadas en astrofísica, la cual permite estudiar el Universo de una forma distinta, revelando información valiosa de objetos celestes que con otros métodos no podríamos conocer, así mismo el estudio en esta longitud de onda tiene ciertas ventajas, dado que este rango del espectro electromagnético puede ser estudiado desde la superficie de la Tierra, además las radioondas no se ven muy afectadas por las condiciones climáticas. Por esta razón se deben aprovechar al máximo las herramientas que facilitan realizar estudios en este campo, un radiotelescopio es el instrumento fundamental que permite alcanzar este propósito. Por lo tanto, el desarrollo de este trabajo deja una herramienta clave y de mucha utilidad para facilitar el estudio de esta importante rama de la ciencia, específicamente para el análisis de la radiación de emisión del Sol en la banda de 12 a 18 GHz.
- La importancia de tener una nueva herramienta de estudio en astrofísica es considerable, dado que abre las puertas para introducirse en este importante campo, además permite que los estudiantes se interesen por la investigación y el desarrollo de la ciencia. Destacando que se pueden desarrollar estas iniciativas teniendo los conocimientos básicos, e incluso contando con bajo presupuesto, como se hizo con este proyecto, dado que se usaron elementos que generalmente se emplean con otros propósitos, pero que al ser modificados cumplen con el objetivo al que se desea llegar.
- Las herramientas de software utilizadas en este trabajo son sencillas de manejar teniendo conocimientos básicos en programación, además están bajo la licencia de software libre, así se desarrolló el sistema de registro y análisis de datos provenientes de la emisión del Sol utilizando programación en Python y software bajo el sistema operativo GNU/Linux.
- A partir de los datos registrados de la emisión del Sol, se pudieron desarrollar los cálculos de los parámetros que permitieron realizar la caracterización del instrumento construido en este trabajo, se encontró que tiene una buena resolución para el propósito desarrollado, también posee una alta directividad, ganancia y eficiencia, por lo tanto se comprueba el funcionamiento eficiente del dispositivo, dado que los parámetros experimentales de caracterización obtenidos están acordes con los valores teóricos esperados.

Recomendaciones

- Durante la etapa del registro de datos, en un principio se tuvo algunas dificultades, debido a la forma en como se debe enfocar el instrumento, por esa razón se recomienda seguir los pasos que al final solucionaron dichos inconvenientes y permitieron lograr el objetivo de este trabajo.
 - Para enfocar el radiotelescopio, se debe tener en cuenta que el cuerpo de estudio esté justo en frente de la línea del eje que sujeta al LNB, si por ejemplo se desea registrar la emisión del Sol, es fácil observar que la sombra del LNB quede justo en el centro de la base (inferior) del plato reflector.
 - Teniendo el instrumento alineado, se debe tener en cuenta que la señal no se esté saturando, esto se puede comprobar cuando se intensifica la señal del sat finder, observando la aguja del galvanómetro o escuchando el sonido del zumbador. De igual manera se debe asegurar que la señal no esté demasiado baja, se recomienda por lo tanto dejar el marcador por lo menos en la mitad, es decir cuando la aguja marca 5.
 - Con estos pasos se asegura un buen resultado en el registro de la señal.
- Con el radiotelescopio en funcionamiento se pueden realizar análisis de datos registrados de la emisión del Sol para encontrar la temperatura de brillo de la cromósfera solar en la banda KU.
- El radiotelescopio tiene una montura alt-azimutal, la cual es sencilla y económica de realizar, sin embargo el cuerpo que se desea estudiar se puede observar una vez al día, si se desea mejorar este sistema se recomienda una montura ecuatorial motorizada que pueda hacer el seguimiento al cuerpo que se desea estudiar.

Bibliografía

- [1] ARDUINO. Arduino. https://www.arduino.cc/. 2017.
- [2] ATMEGA Corporation. ATMEL DATASHEET COMPLETE. Datasheet. 2016.
- [3] BALANIS, C. Antenna Theory, Analysis and Design, 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc. 1997.
- [4] FIELDING, John. AMATEUR RADIO ASTRONOMY. Radio Society of Breat Britain. 2008.
- [5] GARCÍA B, José A. INTRODUCCIÓN A RADIO ASTRONOMÍA. Instituto de Astronomía Universidad Nacional Autónoma de México. 1999.
- [6] KRAUS, John. RADIOASTRONOMY. MCGraw Hill. 2001.
- [7] KRAUS, John. ANTENNAS. MCGraw Hill. 1997.
- [8] LASHLEY, Jeff. The Radio Sky and How to Observe It. Springer New York.
- [9] LÓPEZ P, James. ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS RADIOEMISIONES PRODUCIDAS POR EL PLANETA JÚPITER. Universidad de Nariño. 2003.
- [10] LUNA, Abraham ; DOMINGUEZ Gisela ; COLOMBRES Sergio Alejandro y GARISTA Gilberto F. MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE UN RADIOTELESCOPIO EN LA BANDA DE 12GHZ PARA USOS DOCENTES. Instituto de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) Puebla- México. 2013
- [11] LUNA C, Abraham. *Antenas*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE.
- [12] MORA, Jesús R. Instalación y puesta en marcha de un pequeño Radiotelescopio en la Universidad Politécnica de Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena. 2009.

- [13] PAZ, Martines Gaudencio. IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR DE 43 GHZ EN UN RADIOTELESCOPIO DE 5 METROS. Universidad Autónoma de México. 2010.
- [14] REVISTA Colombiana de Física. SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA OBTENCIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS DE BOCINA. VOL.38, No.4. 2006.
- [15] STUTZMAN W.L. y THIELE G.A., Antenna Theory and Design, John Wiley and Sons, 2nd ed. New York 1998.
- [16] THOMAS L. Wilson, Kristen Rohlfs, HUTTEMEISTER Susanne. Tools Of Radio Astronomy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, Germany.
- [17] TROYA, Juan C. *MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DE LA CROMOSFERA SOLAR EN LA BANDA Ku.* Universidad de Nariño. 2013.
- [18] VAN ROSSUM, Guido, DRAKE, Fred L. *Tutorial de Python*.Copyright Python Software Foundation. 2009.

Anexos

Anexo I

Instalación del Radiotelescopio en el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño

En este anexo se muestra la instalación del radiotelescopio de 83 cm de diámetro en el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, situado en la sede de la Vicerrectoría de Investigaciones, Postgrados y Relaciones Internacionales VIPRI, Bloque 5. De la misma manera se realizó la instalación del software necesario para su correcto funcionamiento.



Fig. I.1: Instalación del instrumento en el Observatorio Astronómico UDENAR.

Fig. I.2: Instalación del radiotelescopio en el Observatorio Astronómico UDENAR.

El radiotelescopio tiene una montura alt-azimutal, para realizar el movimiento de azimut se construyó una plataforma a partir de una placa circular giratoria de referencia SKU:260689 de la marca *VEKER*, la cual fue donada por el Dr Abraham Luna Castellanos, que va ensamblada a una circunferencia de hierro de 30 cm de diámetro y estas a su vez se soldaron a un trípode de hierro, en la figura I.3 se muestra la base

giratoria y en la figura I.4 se indica la base finalizada.



Fig. I.3: Plataforma giratoria circular de $30.48\,$ Fig. I.4: Base del radiotelescopio terminada. cm de diámetro

Los elementos de recepción de la señal del instrumento, como el sat finder y la tarjeta completa del circuito amplificador, se colocaron en una caja plástica de 20 x 15 cm, cada uno de los dispositivos se fijó en su interior, dejando los interruptores en una posición de fácil acceso y manipulación, como se se observa en las siguientes imágenes.



Fig. I.5: Vista superior, donde se observa el buscador de satélites que sobresale en la tapa de la caja.

Fig. I.6: Disposición de los elementos electrónicos en el interior de la caja.

Anexo II Gráficas de Datos Registrados

A continuación se muestran una serie de gráficas que indican los registros de la señal de emisión del Sol realizadas en diferentes fechas, para cada una se indica la gráfica de potencia en decibeles (dB) en función del tiempo en hora local de la ciudad de San Juan de Pasto y la gráfica de potencia en unidades de miliWatts (mW) en función del ángulo (°) haciendo una descripción de las mismas.

Como se puede observar en las gráficas II.1 y II.2 que corresponden a los datos tomados el 11 de noviembre de 2017 la señal llega a un máximo de potencia y se mantiene constante por un intervalo de tiempo, esto nos muestra que dicha señal se ha saturado, lo cual no permite observar adecuadamente la curva que debiera hacer en ese punto, para corregir esta saturación se debió bajar la sensibilidad con el potenciómetro del buscador de satélites, con el fin de regular la señal y evitar que al llegar a ese valor máximo la potencia se sature, este procedimiento es el mismo que se hace cuando se está direccionando una antena parabólica a un satélite en específico como se mencionó en la sección 5.4.



Fig. II.1: Datos 11 de noviembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo. *Coordenadas Azimut:120.6*° - *Altura:51.3*°.



Fig. II.2: Datos 11 de noviembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo. *Coordenadas Azimut:120.6*° - *Altura:51.3*°.

Las gráficas II.3 y II.4 corresponden a los datos del 19 de noviembre de 2017, en las cuales se puede observar que la señal no está muy saturada, pero al atenuar en gran medida el potenciómetro en el buscador de satélites también se disminuye la observación de la variación en el nivel más bajo de la potencia.

Por lo tanto, se debe tener en cuenta al momento de apuntar el instrumento que el sat finder no marque el máximo (en el galvanómetro) cuando la sombra del Sol está justo en el centro de la base del plato reflector; se recomienda que la aguja del galvanómetro marque por lo menos la mitad, es decir 5 en su escala, de manera que al registrar los datos la señal no se satura o queda muy atenuada. Los datos adecuados para realizar el análisis deben presentar un comportamiento donde no se presente saturación y además se requiere también la observación de la variación en la señal más baja de la potencia.



Fig. II.3: Datos 19 de noviembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo. *Coordenadas Azimut:131.7*° *Altura:57.9*°.



Fig. II.4: Datos 19 de noviembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo. *Coordenadas Azimut:131.7*° *Altura:57.9*°.

En las gráficas II.5, II.6 las cuales corresponden al registro de datos del 19 de diciembre, no se observa saturación, pero al igual que las gráficas del 19 de noviembre no se alcanza a distinguir la variación cuando la potencia es mínima.



Fig. II.5: Datos 19 de diciembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo. *Coordenadas* **Azimut**:137.4° - **Altura**:55.7°.



Fig. II.6: Datos 19 de diciembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo. Coordenadas $Azimut:137.4^\circ$ - $Altura:55.7^\circ$

En las gráficas II.7 y II.8 que indican los datos registrados el 20 de diciembre de 2017, se puede observar que siguiendo las sugerencias mencionadas anteriormente se puede ir mejorando el registro de la toma de datos, puesto que la señal no se satura ni se atenúa en gran medida como en las otras gráficas.



Fig. II.7: Datos 20 de diciembre de 2017, potencia (dB) en función del tiempo. Coordenadas $Azimut:119.6^{\circ}$ - $Altura:34.1^{\circ}$.



Fig. II.8: Datos 20 de diciembre de 2017, potencia (mW) en función del ángulo. *Coordenadas Azimut:119.6*° - *Altura:34.1*°.

Se anexan además las gráficas II.9 y II.10 de datos registrados el día 12 de febrero de 2018, donde la señal está saturada y además no es posible observar los pequeños cambios en el mínimo de potencia, esto se presenta con regularidad debido a que para cada nueva toma de datos se debe reajustar el instrumento, tanto en el apuntado de la antena como en el potenciómetro del receptor, de manera que no se puede dejar una medida fija en ellos.



Fig. II.9: Datos 12 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo. Coordenadas $Azimut:119.7^{\circ} - Altura:59.4^{\circ}$.



Fig. II.10: Datos 12 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo. Coordenadas Azimut:119.7° - Altura:59.4°.

En las gráficas II.11 y II.12 se puede observar un mejor registro de los datos tomados el 14 de febrero de 2018, dado que la señal no se ha saturando en gran medida, de la misma manera que no se presenta demasiada atenuación.



Fig. II.11: Datos 14 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo. Coordenadas $Azimut:119.6^{\circ} - Altura:60.8^{\circ}$.



Fig. II.12: Datos 14 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo. *Coordenadas Azimut:119.6*° - *Altura:60.8*°.

En las siguientes gráficas II.13, II.14 y II.15, II.16, se indican las gráficas de datos registrados los días 20 y 21 de febrero de 2018 respectivamente, en estas se tiene un comportamiento adecuado de los datos, debido a que no presentan saturación y se alcanza a distinguir los cambios de la señal cuando registra los valores mínimos de potencia.



Fig. II.13: Datos 20 de febrero de 2018, potencia (dB) en función del tiempo. Coordenadas $Azimut:111.5^{\circ} - Altura:56.1^{\circ}$.



Fig. II.14: Datos 20 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo. Coordenadas $Azimut:111.5^{\circ}$ - $Altura:56.1^{\circ}$.







Fig. II.16: Datos 21 de febrero de 2018, potencia (mW) en función del ángulo. Coordenadas Azimut:110.2° - Altura:54.9°.