



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**PUESTA EN SERVICIO DEL TELESCOPIO CPT (CHARTS PATHFINDER
TELESCOPE) EN CERRO CALÁN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

VICENTE RODRIGO AITKEN ALBORNOZ

PROFESOR GUÍA:
RICARDO FINGER CAMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
TOMAS CASSANELLI ESPEJO
FRANCO CUROTTO MOLINA

Este trabajo ha sido financiado por:
Fondo ANID Basal FB210003, FONDEF ID21-10359.
Fondecyt 1221662, ANID / Fondo 2023 QUIMAL / QUIMAL230001.
Dunlap Seed Founding Program por la familia David Dunlap y la Universidad de Toronto.

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÍCO
POR: VICENTE RODRIGO AITKEN ALBORNOZ
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: RICARDO FIGNER CAMUS

PUESTA EN SERVICIO DEL TELESCOPIO CPT (CHARTS PATHFINDER TELESCOPE) EN CERRO CALÁN

En el presente trabajo se describe el ensamblaje, caracterización y puesta en servicio del nuevo telescopio *CHARTS Pathfinder Telescope* (CPT), un radiotelescopio de 3 metros de diámetro ubicado en la cumbre del cerro Calán, en el Observatorio Astronómico Nacional de Chile. Este proyecto tiene un enfoque práctico en el desarrollo de herramientas para la astronomía, involucrando disciplinas como la mecánica, electrónica, radiofrecuencia y software.

El proceso de ensamblaje significó el montaje del reflector parabólico, la montura alt azimutal y el receptor de radiofrecuencia. El sistema electrónico y de adquisición se centró en una solución de bajo costo y alta eficiencia, utilizando radios definidas por software (SDR), amplificadores de bajo ruido y filtros de pasa banda. También se diseñó software para la observación de cuerpos celestes y calibración del instrumento.

La caracterización del telescopio incluyó la medición del patrón de radiación para sus frecuencias de interés, con un HPBW de 4.5 grados a 1.4 GHz y 7.5 a 400 MHz donde se obtuvo una ganancia de 31.5 dBi y una directividad(dB) de 39.7 para la banda de calibración de H1. Estos experimentos corroboraron que el comportamiento del telescopio corresponde para una antena de estas características. El proyecto culmina con la “primera luz” al observar la curva de H1 en el centro galáctico, observación que resultó exitosa con una curva distinta al fondo, dando paso a la vida útil de este nuevo instrumento.

Con la operación del CPT se espera poder realizar estudios universitarios y astronómicos más complejos, como interferometría de larga base, estudios de llamaradas solares y apoyo en el estudio de ráfagas rápidas de radio (FRB). Este trabajo significa un avance en la capacidad técnica de instrumentación para la comunidad científica local y también como un componente para colaboraciones internacionales como la iniciativa del proyecto CHARTS.

*But remember this, Japanese boy...
airplanes are not tools for war.
They are not for making money.
Airplanes are beautiful dreams.
Engineers turn dreams into reality.*

- Hayao Miyazaki

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mi profesor guía Ricardo Finger, quien no solo me entrega esta oportunidad de liderar un proyecto de tal envergadura, sino que también entrego importantes esfuerzos para llevarlo adelante y me devolvió la oportunidad de realizar algo que en algún momento solo era un sueño. Agradezco a Tomás Cassanelli por creer en mis habilidades y permitirme involucrarme en el proyecto y a Franco Curotto, quien me entrega valiosos consejos y apoyo en el proceso y nunca dudo del éxito que alcanzaría.

Agradezco a mis segundas familias, quienes sin su apoyo probablemente no haya llegado tan lejos. Gracias equipo del laboratorio MWL, Claudia y el humor, Gonzalo y el conocimiento, Diego y las pesas, Juan y los chistes, José y las piezas, Sebita, Juan Francisco y el curso, Pancho, José, gracias por su apoyo en este proyecto, la calidez y el humor que levanta la frente cada lunes.

Gracias equipo de atletismo de la FCFM y de la Universidad de Chile, por ser mi fuente de energía y motivación en los momentos más difíciles y por ser mi escape de la rutina. Gracias Joaco, Karen, Profesor Mario, Fica, Fefi, Chimi, lanzadores, que la pista y el foso no sería lo mismo sin ustedes.

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional, por creer en mí y darmel todo para poder avanzar en este viaje tan largo y lleno de desafíos. Gracias, amigos, por estar siempre ahí, aunque los años pasen y las distancias se hagan más grandes, siempre están en mi corazón.

Gracias a los primeros, ro y Joaco, los que me siguieron, Pepe, Jano y Yohans, y los encontré después, Cata, Magda, Diego, Marcelo, Cami, Mati. Sinceramente, la mejor época de nuestras vidas no hubiera sido lo mismo sin ustedes y muchos otros que no nombro.

Dejo una mención a esas bandas que me acompañaron en los momentos de estudio, de trabajo, de relajo, de fiesta, de tristeza, de felicidad, de amor, de desamor, de todo. Muse, System of A Down, Alter Bridge, The Wombats, Radiohead, Jorge Drexler entre muchas otras.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Específicos	2
1.3.1. Ensamblado Mecánico	2
1.3.2. Diseño del receptor	2
1.3.3. Primera Luz y Caracterización	2
1.3.4. Observar Hidrógeno neutro	2
2. Antecedentes	3
2.1. Fundamentos de antenas	3
2.1.1. Patrón de radiación	3
2.1.2. Directividad	5
2.1.3. Ganancia	5
2.1.4. Polarización	6
2.1.5. Ancho de banda	7
2.1.6. Perdidas y eficiencia	9
2.1.7. Ecuación de Friis	10
2.2. Antenas parabólicas	11
2.2.1. Tipos de antenas parabólicas	11
2.2.2. Antenas de alimentación	13
2.3. Receptores heterodinos	13
2.3.1. Radio definida por software	14
2.4. Radiotelescopios	14
2.4.1. Línea de Hidrógeno Neutro	14
2.4.2. CHARTS y FRB	14
2.5. Telescopio CPT	15
2.6. Métodos de caracterización	16
2.6.1. Medición de patrón de radiación	16
2.6.2. Medición de la temperatura de ruido	16
3. Ensamblaje e instrumentación	18
3.1. Ensamblado Mecánico	18
3.1.1. Reflector Parabólico	19
3.1.2. Diseño de soportes adicionales	20
3.1.3. Montura Alt-Azimutal	24
3.1.4. Rack de control	26

3.2.	Alimentador	27
3.2.1.	LPDA de alto ancho de banda	27
3.2.2.	Dipolo exótico	28
3.2.3.	Antena circular de alto ancho de banda	28
3.3.	Diseño del receptor	29
3.3.1.	Cadena de recepción	29
3.3.2.	Digitalizador y adquisición	30
3.4.	Software de control y adquisición	31
3.4.1.	Control de la montura	32
3.4.2.	Adquisición de datos	33
3.5.	Infraestructura de caracterización	33
3.5.1.	Fuente de calibración	33
3.5.2.	Fuente de ruido	35
3.5.3.	Software de caracterización	35
4.	Caracterización y puesta en servicio	37
4.1.	Enfoque del alimentador	37
4.1.1.	Alimentador sin soportes a 70 metros	37
4.1.2.	Alimentador con soportes con la estrella artificial	39
4.2.	Medición del patrón de radiación	41
4.2.1.	Medición relativa para banda de H1	41
4.2.2.	Medición absoluta para todas las bandas de interés	41
4.3.	Sensibilidad y temperatura de ruido	41
4.3.1.	Medición de la temperatura de ruido	42
4.4.	Medición del error de apuntamiento	42
4.5.	Primera luz	42
5.	Analisis de Resultados	43
5.1.	Posición del alimentador	43
5.2.	Patrón de radiación	44
5.3.	Ganancia y Directividad	46
5.4.	Sensibilidad	46
5.5.	Error de apuntamiento	46
5.6.	Ancho de banda	46
5.7.	Primera luz	46
6.	Conclusiones	47
6.1.	Trabajos Futuros	47
Bibliografía		49

Índice de Ilustraciones

2.1.	Parámetros del patrón de radiación para una antena con características directivas. [3].	4
2.2.	Polarización lineal de una onda electromagnética propagándose en el eje Z.	7
2.3.	Polarización circular de una onda electromagnética propagándose en el eje Z.	7
2.4.	Diagrama de parámetros S para un dispositivo bajo prueba (DUT).	8
2.5.	Ancho de banda de reflexión de una antena.	8
2.6.	Figura de una cadena de recepción con un filtro de paso de banda.	9
2.7.	Antena de 12 metros Vertex tipo Cassegrain en el observatorio de ALMA.	11
2.8.	Telescopio Effelsberg de 100 metros de tipo Gregorian.	12
2.9.	Telescopio GBT (Green Bank Telescope) de 100 metros de tipo <i>off-axis</i>	13
2.10.	Telescopio CPT en el cerro Calán siguiendo el centro de la galaxia.	15
2.11.	Diagrama de un sistema de medición de patrón de radiación para una antena bajo prueba (AUT) en campo lejano.	16
3.1.	Herramientas utilizadas para el ensamblado de la superficie del reflector parabólico.	19
3.2.	Los 12 arcos de aluminio sujetos al centro del reflector parabólico.	19
3.3.	Los tubos de aluminio y la cinta de aluminio para la tensión de la malla metálica instalados radialmente en los soportes.	20
3.4.	Union de los soportes de aluminio para el alimentador.	21
3.5.	Interfaz de soporte para el tubo de distribución y otros elementos	22
3.6.	Soporte interno para electrónica de recepción	22
3.7.	Soporte para la fuente de calibración de la copa de agua “estrella artificial”	23
3.8.	Soporte para antena circular de alto ancho de banda para configuración de alimentador	23
3.9.	Soporte para el dipolo exótico como alimentador de 1420MHz	24
3.10.	Rotor <i>BIG-RAS/HR</i> de la compañía <i>RFHamdesign</i> instalada en el pedestal con la montura de acero.	25
3.11.	Montura de acero con los contrapesos de equilibrio instalados.	25
3.12.	Rack de control con el controlador SPID de la montura y el computador de control.	26
3.13.	Antena LPDA de alto ancho de banda instalada en el telescopio.	27
3.14.	Dipolo de ARTE instalado en el telescopio.	28
3.15.	Antena circular de alto ancho de banda instalada en el telescopio.	29
3.16.	Amplificador y filtro pasabanda SAWbird H1 de la compañía <i>Noeelec</i>	30
3.17.	RTL-SDR conectada a la cadena de amplificador y una Raspberry PI 4B.	31
3.18.	cpt_traking_software.py en funcionamiento.	32
3.20.	Generador de señales Valon 5008 con filtro pasabajo con una batería externa.	34
3.21.	Fuente de ruido Agilent 346B.	35
4.1.	Antena LPDA en trípode auxiliar a 2 metros de altura.	38

4.3.	Distancia de 70 metros entre el reflector y el generador de señales con elevaciones similares.	39
4.4.	Distancia de 188 metros entre el reflector y la estrella artificial de la copa de agua.	40
4.5.	Alimentador dipolo exótico con tetrápodo instalado.	40
5.1.	Antena construida siendo monitoriada por la camara remota	43
5.2.	Corte azimutal patrón de radiación a 1428 MHz	44
5.3.	Corte elevacion patrón de radiación a 1428 MHz	45
5.4.	Patrón de radiación a 400 MHz	46

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La construcción de un nuevo instrumento de observación astronómica conlleva diversos desafíos, oportunidades y nuevos conocimientos. El posicionamiento de un nuevo radiotelescopio de 3 metros de diámetro es un proyecto que involucra distintos aspectos mecánicos, electrónicos, de radiofrecuencia o RF y de software.

En la cumbre del Cerro Calan, en la ciudad de Santiago, se ubica el Observatorio Astronómico Nacional y el departamento de astronomía de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile. Aquí se encuentra el telescopio CPT (CHARTS Pathfinder Telescope), un radiotelescopio de reflector parabólico de 3 metros de diámetro, de superficie de malla metálica y con una montura alt azimutal. En este documento se detalla el proceso de construcción mecánica, electrónica y de software para la caracterización y puesta en servicio de este telescopio.

Las capacidades de observación de un telescopio de radio son definidas con las características de su antena receptora y sus propiedades de sensibilidad, resolución angular y ancho de banda. Lo cual es también definido por el propósito de construcción y los intereses científicos de los investigadores. Para el caso del CPT, se busca observar la línea de emisión de hidrógeno neutro, a una frecuencia de 1420 MHz, con el propósito de validar la funcionalidad del telescopio para realizar mediciones de radioastronomía, ya que la emisión de hidrógeno neutro o H1 es una de las más estudiadas del espectro de radio.

Luego de la puesta en servicio del telescopio, se espera poder adaptar el receptor para un ancho de banda superior y realizar estudios de interferometría de larga base con otros telescopios, estudiar la detección temprana de llamaradas solares y apoyar al proyecto CHARTS (Canadian-Chilean Array for Radio Transient Studies) en el estudio del fenómeno astrofísico de ráfagas rápidas de radio (FRB). Por lo que todas las decisiones de diseño y construcción, fueron tomadas, teniendo en cuenta todas las capacidades que se pensaron en la concepción de este instrumento.

Durante este trabajo se detallan los procesos de construcción mecánica del reflector parabólico, el ensamblaje de la montura alt azimutal, el diseño y construcción del receptor de radiofrecuencia. También se detallan los trabajos de caracterización del telescopio con

la medición de su patrón de radiación, su sensibilidad y resolución angular. Para culminar con su primera luz, un evento en el cual todo telescopio observa por primera vez una fuente astronómica, dando al inicio a su vida útil como instrumento de observación.

1.2. Objetivo General

Ensamblado, integración y puesta en servicio de un radiotelescopio de 3 metros de diámetro para docencia e investigación en nuevas tecnologías para radioastronomía.

1.3. Objetivos Específicos

1.3.1. Ensamblado Mecánico

Ensamblar reflector parabólico a utilizar, asegurando su integridad mecánica y funcionamiento del motor en su montura.

1.3.2. Diseño del receptor

Evaluación de las distintas opciones de diseño de la antena receptora e integrar la electrónica de adquisición para las frecuencias de interés.

1.3.3. Primera Luz y Caracterización

Caracterizar los parámetros de funcionamiento del telescopio y detectar las primeras ondas de radio.

1.3.4. Observar Hidrógeno neutro

Iniciar los estudios astronómicos observando una de las bandas de diseño de 1420 MHz o línea de Hidrógeno.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se expondrán los fundamentos teóricos y conceptuales necesarios en el desarrollo del proyecto. Se abordarán los principales conceptos y características de las antenas, teniendo en cuenta que por naturaleza un radiotelescopio es una antena. Además, se explicará el funcionamiento de los receptores heterodinos, principal componente utilizado en la digitalización y adquisición de señales de RF. Para finalmente, abordar el concepto de radiotelescopio, la importancia de la línea de Hidrógeno neutro y el proyecto CHARTS.

2.1. Fundamentos de antenas

Una antena es un dispositivo usualmente pasivo que convierte radiación electromagnética del ambiente en corriente eléctrica y viceversa, dependiendo para que se utilice, pueden ser configuradas para recibir o transmitir señales. Un radiotelescopio son antenas receptoras. Suele ser fácil calcular las propiedades de una antena transmisora y medir las propiedades de una antena receptora. Afortunadamente, la mayor parte de las propiedades de una antena transmisora (como el patrón de radiación) son equivalentes al usar esta misma antena como receptora, así como cualquier medición de una antena receptora puede ser aplicada a esta antena cuando es usada para la transmisión [1].

2.1.1. Patrón de radiación

El patrón de radiación es una representación gráfica de las propiedades radiativas de una antena. Se define como el gráfico de potencia transmitida por la antena, evaluada sobre una esfera de radio constante. Por razones prácticas se estudian cortes del patrón de radiación. Estos cortes son las curvas tridimensionales del patrón que son contenidas en la intersección de la esfera pasando por el origen.

Para poder medir la potencia radiada por una antena, se debe obtener utilizando la aproximación de campo lejano. El campo lejano es la distancia donde debe encontrarse una fuente puntual para que sus ondas recibidas sean planas [1]. Lo que en consecuencia significa que la radiación se propaga en modo TEM, es decir, que la componente eléctrica es perpendicular a la componente magnética y ambas son perpendiculares a la dirección de propagación, esto permite solo utilizar el campo eléctrico para describir la radiación [2].

Campo Lejano

La definición de la distancia de campo lejano depende tanto de la longitud de onda λ como el tamaño de la antena D , o diámetro para antenas de apertura parabólicas. La distancia de campo lejano se define como:

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

Se utiliza las definiciones de campo eléctrico normalizado y potencia normalizada para poder expresar el patrón de radiación en decibelios. Utilizando el máximo como el valor de referencia. La potencia normalizada se define como:

$$\vec{F}(\theta, \Phi) = \frac{E(\vec{\theta}, \phi)}{\max|\vec{E}(\theta, \phi)|} \quad (2.2)$$

$$P(\theta, \phi) = |\vec{F}(\theta, \phi)|^2 \quad (2.3)$$

$$P(\theta, \phi)_{dB} = 10 \log P(\theta, \phi) = 20 \log |\vec{F}| = F(\theta, \phi) \quad (2.4)$$

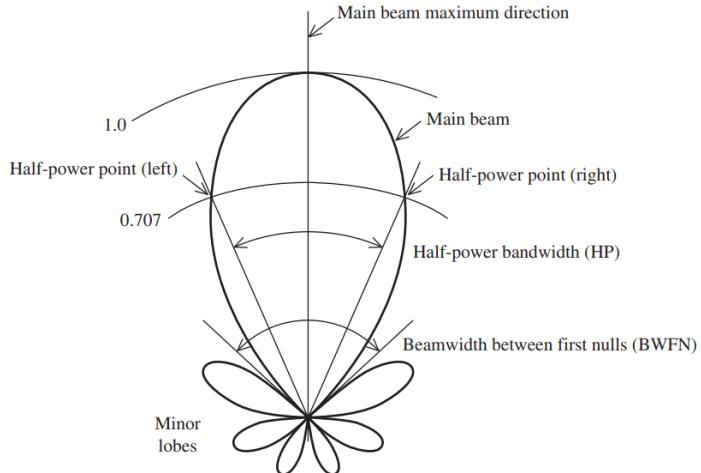


Figura 2.1: Parámetros del patrón de radiación para una antena con características directivas. [3].

La figura 2.1, muestra un patrón de radiación de una antena directiva, donde se pueden observar los lóbulos laterales y el haz principal. El haz principal es la dirección de máxima radiación, mientras que los lóbulos laterales son las direcciones de radiación secundarias.

El haz principal se define en términos de potencia y se conoce como HPBW o Haz de Media Potencia. El HPBW es el ángulo entre los puntos de la curva de radiación que tienen la mitad de la potencia máxima, es decir donde se ve una disminución de 3 dB.

2.1.2. Directividad

La directividad (D) se define como la razón de intensidad de radiación en una dirección específica con respecto a la intensidad promedio de radiación en todas las direcciones. Esta referencia se toma desde el máximo de radiación.

$$D = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{prom}}} \quad (2.5)$$

Donde $U(\theta, \phi)$ es la densidad de potencia radiada en una dirección específica y U_{prom} es la densidad de potencia promedio. Lo que da a entender que la directividad es comúnnamente adimensional.

La directividad se puede expresar directamente del patrón de radiación de la antena. Para esto se define un haz de ángulo sólido $d\Omega$ y se integra sobre la superficie de una esfera de radio R .

$$\Omega_A = \iint_{\text{esfera}} |F(\theta, \phi)|^2 d\Omega \quad (2.6)$$

El ángulo sólido de un haz de un patrón de radiación tiene el mismo máximo de intensidad de radiación que toda el área del ángulo sólido del haz.

$$P = U_{\text{prom}} \Omega_A \quad (2.7)$$

Finalmente, si se reemplaza la ecuación 2.6 en la ecuación 2.7 se obtiene la directividad de la antena a partir del ángulo sólido del haz del patrón de radiación.

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.8)$$

Esto quiere decir que la directividad está completamente definida por la forma del patrón de radiación. Haciendo que sea totalmente independiente de la construcción de la antena [3].

2.1.3. Ganancia

La ganancia de una antena se define como la potencia transmitida en una dirección específica con respecto a la potencia transmitida por una antena isotrópica. La ganancia se define como:

$$G = \frac{4\pi U_m}{P_{in}} \quad (2.9)$$

Donde U_m es la densidad de potencia máxima y P_{in} es la potencia de entrada a la antena. La ganancia también se puede representar como la directividad multiplicada por la eficiencia de la antena.

$$G = \varepsilon D \quad (2.10)$$

La eficiencia de una antena se define como la razón de la potencia radiada por la antena a la potencia total suministrada a la antena.

$$\varepsilon = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (2.11)$$

En el caso particular de una antena de apertura, el término de la eficiencia también incluye factores como la iluminación de la antena y las pérdidas de la superficie, las cuales se denominan eficiencia de apertura y eficiencia de superficie respectivamente.

$$\varepsilon_{ap} = e_r \varepsilon_t \varepsilon_s \varepsilon_a \quad (2.12)$$

Donde e_r es la eficiencia de la radiación, ε_t es la eficiencia *taper* o de cobertura, ε_s de *spillover* o de derrame e ε_a es la eficiencia de *achivement* o de completitud, la cual incluye muchas otras fuentes de perdidas.

Así, la ganancia de una antena de apertura es directamente proporcional a su apertura física y a la longitud de onda de la señal que se desea recibir.

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} = \varepsilon_{ap} D \quad (2.13)$$

A es el área de la apertura de la antena y λ es la longitud de onda.

2.1.4. Polarización

La polarización de una antena es la polarización de la onda electromagnética irradiada en una dirección dada por la antena al transmitir. Se describe como la orientación del campo eléctrico de la onda.

Poner Imagen

Figura 2.2: Polarización lineal de una onda electromagnética propagándose en el eje Z.

Los tipos de polarización se dividen en polarización lineal, polarización circular y la combinación de ambas, la polarización elíptica. La figura 2.2 muestra una onda electromagnética linealmente polarizada en orientación vertical.

Poner Imagen

Figura 2.3: Polarización circular de una onda electromagnética propagándose en el eje Z.

La figura 2.3 muestra una onda electromagnética circularmente polarizada en sentido horario.

2.1.5. Ancho de banda

El rango de frecuencia en el cual una antena opera con su mejor eficiencia se le denomina como ancho de banda. El ancho de banda se define considerando los parámetros de reflexión y de radiación de potencia, siendo comúnmente utilizados los parámetros de reflexión S_{11} y

transmisión S_{21} para esta caracterización.

Los parámetros S son los que definen la respuesta de un medio a una onda electromagnética. Existen los parámetros S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22} , donde S_{11} es el parámetro de reflexión, S_{12} es el parámetro de transmisión, S_{21} es el parámetro de transmisión inversa y S_{22} es el parámetro de reflexión inversa.

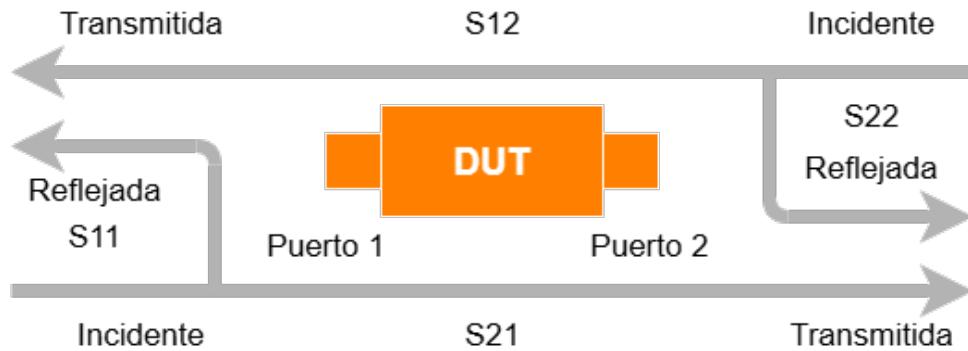


Figura 2.4: Diagrama de parámetros S para un dispositivo bajo prueba (DUT).

La figura 2.4 muestra las diferentes configuraciones para lograr la obtención de los parámetros S.

Ancho de banda S_{11}

El ancho de banda de reflexión se define como el rango de frecuencia en el cual el parámetro de reflexión S_{11} es menor a un valor específico, comúnmente -10 dB. Lo que corresponde a que el 90 % de la potencia inyectada es irradiada y solo el 10 % reflejada

Poner Imagen

Figura 2.5: Ancho de banda de reflexión de una antena.

La figura 2.5 muestra el ancho de banda de reflexión de una antena.

Ancho de banda S_{21}

El ancho de banda de transmisión se define como el rango de frecuencia en el cual el parámetro de transmisión S_{21} es mayor a un valor específico, comúnmente lo más cercano a 0 posible, sin embargo, cuando se utilizan componentes activos como cadenas de amplificación, este valor suele aumentar de 0 dB, lo que significa realizar un estudio más profundo del valor esperado.

Poner Imagen

Figura 2.6: Figura de una cadena de recepción con un filtro de paso de banda.

La figura 2.6 muestra el ancho de banda de un filtro de pasabanda definiendo la figura de una cadena de recepción o transmisión.

2.1.6. Perdidas y eficiencia

En la propagación de ondas electromagnéticas se producen pérdidas de varias fuentes, las relacionadas con el medio de propagación son las pérdidas de espacio libre y las pérdidas ohmáticas, pero en el contexto de una antena de apertura de reflector parabólico, se encuentran también las pérdidas de superficie y las pérdidas de alimentación.

Impedancia de entrada

Los sistemas de radiofrecuencia se caracterizan por tener una impedancia asociada a la entrada y salida de los componentes que forman un sistema. Propiamente la impedancia no significa una perdida en sí misma, pero si existen diferencias de acoplamiento de impedancia pueden empezar a encontrar pérdidas asociadas.

Como práctica común, se busca que la impedancia tanto de salida como entrada de los elementos de un sistema de RF sea de 50Ω , pero también existen otros estándares de impedancia como los utilizados en sistemas de televisión e internet, los cuales están estandarizados a 75Ω .

No todas las antenas una vez construidas tienen una impedancia intrínseca de 50Ω , por lo que se deben utilizar elementos de adaptación de impedancia para lograr la mejor trans-

ferencia de potencia, a estos elementos se les conoce como *baluns*.

Pérdidas de espacio libre

Las pérdidas de espacio libre son las pérdidas asociadas a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la distancia de propagación y a la frecuencia de la señal.

$$L_{fs} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2.14)$$

Donde d es la distancia de propagación y λ es la longitud de onda de la señal.

Pérdidas de superficie

Las pérdidas de superficie están asociadas al término de eficiencia de superficie de las antenas de apertura. Estas pérdidas se deben a las imperfecciones en la superficie en relación a la longitud de onda de la señal. Se puede entender que para una longitud de onda muy grande (entre 70 cm y 10 cm) si la superficie presenta imperfecciones menores a 1 cm se puede hablar de una superficie perfecta.

Lo anterior da la posibilidad de utilizar superficies agujeradas o con perforaciones para reducir el peso de la antena y mejorar la eficiencia de la superficie por imperfección de curvatura.

Pérdidas ohmáticas

Las pérdidas ohmáticas son las perdidas asociadas a la resistencia de los materiales conductores de la antena. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la corriente que circula por el conductor y al cuadrado de la resistencia del conductor.

$$P_{ohm} = I^2 R \quad (2.15)$$

Donde P_{ohm} es la potencia disipada por perdidas ohmáticas, I es la corriente que circula por el conductor y R es la resistencia del conductor.

Estos efectos se aprecian al utilizar conductores coaxiales de grandes longitudes, un factor a considerar en la construcción de antenas.

2.1.7. Ecuación de Friis

La ecuación de Friss es una fórmula de transmisión para un circuito de radiofrecuencia compuesto por dos antenas, una antena transmisora u otra receptora en espacio libre [4]. La ecuación se define como:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.16)$$

Donde P_r es la potencia recibida, P_t es la potencia transmitida, G_t es la ganancia de la antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, λ es la longitud de onda de la señal y d es la distancia de propagación.

2.2. Antenas parabólicas

Una antena parabólica es una antena de apertura que se compone de una superficie reflectante parabólica y una antena alimentadora. Se caracterizan por tener una alta directividad y ganancia, por lo que son utilizadas en aplicaciones de comunicación de largo alcance y en radiotelescopios, donde se requiere una alta sensibilidad.

2.2.1. Tipos de antenas parabólicas

Las antenas parabólicas se pueden clasificar en 4 tipos de configuraciones, *Cassegrain*, *Gregorian*, *off-axis* o fuera de foco y *axial feed* o Foco Primario.

Cassegrain

Las antenas de tipo Cassegrain, son aquellas que utilizan un reflector secundario para redirigir la radiación hacia la antena alimentadora. El reflector secundario es un hiperboloide de revolución que se ubica en el foco de la parábola principal y se orienta hacia la antena alimentadora.



Figura 2.7: Antena de 12 metros Vertex tipo Cassegrain en el observatorio de ALMA.

Gregorian

Las antenas de tipo Gregorian, son aquellas que utilizan un reflector secundario para redirigir la radiación hacia la antena alimentadora. El reflector secundario es un elipsode de revolución que se ubica en el foco de la parábola principal y se orienta hacia la antena alimentadora.



Figura 2.8: Telescopio Effelsberg de 100 metros de tipo Gregorian.

Off-axis

Las antenas de tipo *off-axis* o fuera de foco, son aquellas en las cuales la antena alimentadora se encuentra fuera de los ejes de la parábola principal, extendiendo el reflector principal. Este tipo de antenas se utilizan en aplicaciones donde se requiere una mayor área de cobertura revisando la obstrucción de la antena alimentadora.



Figura 2.9: Telescopio GBT (Green Bank Telescope) de 100 metros de tipo *off-axis*.

Foco primario

Las antenas de tipo foco primario, son aquellas donde la antena alimentadora se encuentra en el foco de la parábola principal. Este tipo de antenas son más simples de construir, pero tienen otros desafíos ópticos y de diseño.

2.2.2. Antenas de alimentación

Las antenas alimentadoras son los elementos ubicados en el foco de la parábola principal que capturan la radiación concentrada por el reflector. Estas antenas deben tener un patrón de radiación adecuado para el tipo de diseño de la antena parabólica.

Las antenas alimentadoras pueden ser de distintos tipos, como antenas de parche, antenas de bocina, antenas yagui-uda, antenas log-periódicas, antenas de semiespacio, entre otras. El tipo de antena alimentadora a utilizar dependerá del tipo de antena parabólica y de la aplicación de la antena, sin embargo, las antenas de bocina son las más utilizadas en antenas parabólicas de reflector secundario.

2.3. Receptores heterodinos

Los receptores comúnmente utilizados en radioastronomía son bastante similares a los utilizados en telecomunicaciones. La característica principal de estos receptores es convertir las señales incidentes a un rango de frecuencia menor conservando la fase y la amplitud, esta frecuencia se le conoce como frecuencia intermedia o IF, la cual es procesada a posteriori para extraer su información [5].

En todos los receptores heterodinos se utiliza un mezclador para realizar la conversión de frecuencia, este es un dispositivo no lineal que procesa las señales con una señal de referencia conocida como oscilador local.

2.3.1. Radio definida por software

Una radio definida por software o SDR, es un receptor heterodino con un oscilador reprogramable y entrega la señal de IF a un computador para su procesamiento. Estos receptores se pueden reconfigurar para sintonizar distintas frecuencias, para luego entregar las muestras digitales a un computador y así procesar la señal, como por ejemplo, realizar una transformada de Fourier para obtener el espectro de la señal.

2.4. Radiotelescopios

Tal como los telescopios ópticos que concentran la luz visible en un foco, la amplifican y procesan para que sea analizada por diversos instrumentos, también los radiotelescopios concentran la luz de las ondas de radio de las estrellas y otros cuerpos celestes. Estos telescopios son diseñados para observar las ondas más grandes de la luz, desde 1 mm a 10 metros de longitud de onda. [6]

Un radiotelescopio a diferencia de un telescopio óptico posee una ventaja única. La radiación observada es coherente, por lo que existen los amplificadores coherentes, los cuales mantienen la información de la fase de la señal. Esta cualidad permite la construcción de interferómetros y telescopios de apertura sintética [1].

2.4.1. Línea de Hidrógeno Neutro

El movimiento de un electrón en un átomo de Hidrógeno neutro genera un campo magnético que se acopla con los espines del protón y el electrón. “Este acople da cuenta de la radiación a 1420 MHz que viene de la transición entre dos niveles energéticos de primer nivel del estado fundamental del Hidrógeno” [7].

La línea de hidrógeno neutro o H1, es una de las líneas espectrales más importantes en radioastronomía, ya que permite observar la distribución de gas en las galaxias y la evolución del universo primitivo. También es una de las más estudiadas y catalogadas por muchos otros telescopios.

2.4.2. CHARTS y FRB

Los fenómenos astrofísicos transitorios de radio o FRB, son eventos de extremadamente corta duración y origen desconocido que ocurren en un amplio rango de frecuencias. Estos pulsos inspiraron el proyecto CHARTS, para apoyar su búsqueda y estudio.

El proyecto CHARTS, es una colaboración entre la Universidad de Chile y la Universidad de Toronto con el objetivo de construir un arreglo de 128 sintonizadas para operar en el rango de 300MHz a 500MHz en el marco de la búsqueda de FRB.

2.5. Telescopio CPT

El telescopio CPT, *CHARTS Pathfinder Telescope*, es un telescopio de 3 metros de diámetro con una configuración de foco primario. Este telescopio se encuentra en la cumbre del cerro Calán en Santiago de Chile, siendo parte del departamento de astronomía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

El reflector de este telescopio es un paraboloide de 3 metros de diámetro, con una estructura de aluminio unida con remaches y pernos. Su superficie reflectante es de malla de acero galvanizado con separación de 6 mm, el anillo exterior es de una cinta de aluminio de 3x20 mm. El soporte del alimentador es de 4 perfiles de aluminio de 2x2 cm de 2 metros de largo [8].

La eficiencia de superficie que estima el fabricante es de 65 % teniendo su ganancia máxima a 5760 MHz con 43.3 dB y a 1296 MHz con 30.3 dB. Tanto el reflector como la montura alt-azimutal son de la compañía holandesa *RFHAmdesign*.



Figura 2.10: Telescopio CPT en el cerro Calán siguiendo el centro de la galaxia.

El propósito para poner en servicio este telescopio es observar la línea espectral de hidrógeno neutro de 21 cm de longitud de onda, para caracterizar todos los aspectos de la antena

y comenzar a realizar observaciones de radioastronomía. Luego se ampliarán sus capacidades para apoyar al proyecto CHARTS en la banda de 300 MHz a 500 MHz y hacer observaciones solares de alto ancho de banda desde 1 GHz a 6 GHz.

2.6. Métodos de caracterización

Los siguientes métodos son los más comunes en la caracterización de antenas y radiotelescopios para medir su desempeño y definir sus capacidades como instrumentos astronómicos.

2.6.1. Medición de patrón de radiación

El método más directo para la medición del patrón de radiación es el de campo lejano y al tratarse de antenas de apertura de grandes dimensiones, presenta varios desafíos prácticos y técnicos, especialmente a altas frecuencias[2].

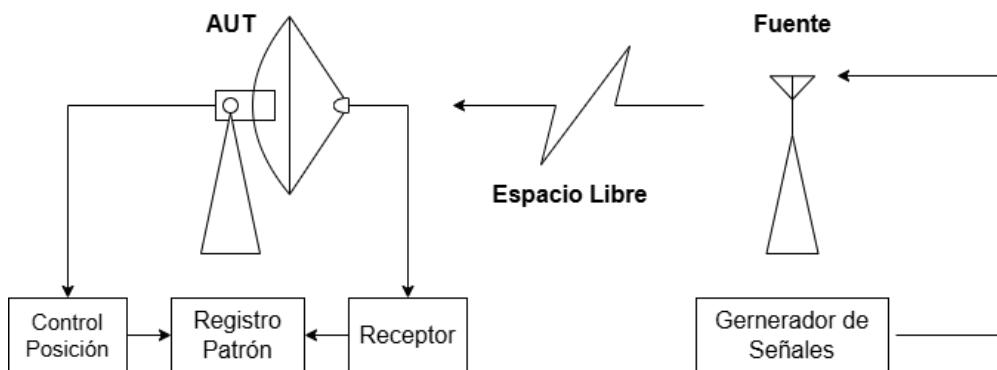


Figura 2.11: Diagrama de un sistema de medición de patrón de radiación para una antena bajo prueba (AUT) en campo lejano.

La figura 2.11 muestra un diagrama de un sistema básico necesario para poder realizar la medición, el cual requiere la antena objetivo, la que se quiere caracterizar. La antena fuente, que es la que genera la radiación para medir la antena objetivo. Además de todo el equipo e instrumentación necesaria.

2.6.2. Medición de la temperatura de ruido

Para medir la temperatura de ruido de un sistema, se puede utilizar el método de factor Y, el cual consiste en utilizar una fuente de ruido de ENR, conocida como *Excess Noise Ratio* o la relación de exceso de ruido, la cual se conecta a la antena y se mide la potencia de ruido en la salida del receptor.

La medición se realiza obteniendo la temperatura del sistema cuando se enciende la fuente de ruido y cuando se apaga, siendo estas temperaturas como T_{hot} y T_{cold} o temperatura caliente y temperatura fría respectivamente.

El ruido de ENR se obtiene a 2 “temperaturas de ruido” conocidas, una a temperatura ambiente y otra a la temperatura con la fuente encendida.

$$ENR = \frac{T_{hot} - 290}{290} \quad (2.17)$$

Considerando la temperatura ambiente como 290 grados K. ENR se logra polarizando la fuente de ruido y para obtener el factor Y utilizamos la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{\frac{T_{hot}}{T_{cold}} + \frac{T_{noise}}{T_{cold}}}{1 + \frac{T_{noise}}{T_{cold}}} \quad (2.18)$$

Donde T_{noise} es la temperatura de ruido del sistema. Así para obtener la figura de ruido se necesita el factor de ruido F, $F = T_{noise}/T_{cold} + 1$, para luego reemplazarlo en $NF = 10\log(F)$ [9].

Capítulo 3

Ensamblaje e instrumentación

En este capítulo se presentarán todos los detalles del ensamblado del reflector parabólico, la instalación del rotor y la integración de estos con el soporte de la montura en el pedestal construido para el telescopio. También se detallarán todos los instrumentos evaluados y seleccionados para la construcción del receptor de radiofrecuencia, el rack de control y la infraestructura de caracterización.

Junto con esto, se mostrarán todas las piezas diseñadas e impresas en 3D para el soporte del alimentador y todos los soportes específicos que se necesitaron para la instalación de los distintos componentes del telescopio.

Para finalizar con la descripción del software creado para la operación, mantenimiento y caracterización del telescopio.

3.1. Ensamblado Mecánico

Tanto el reflector parabólico como la montura alt azimutal y su correspondiente controlador, son elementos adquiridos de la compañía *RFHamdesign*, una empresa holandesa que se especializa en la construcción de telescopios de radio aficionados. El reflector de 3 metros se encontraba completamente desarmado y con piezas que requerían ser modificadas y ensambladas para su correcto funcionamiento.

Para todo el ensamblado se utilizaron herramientas manuales y eléctricas, como taladros, tijeras de hojalata, remachadoras, etc.



Figura 3.1: Herramientas utilizadas para el ensamblado de la superficie del reflector parabólico.

En la figura 3.1 se pueden ver las herramientas utilizadas para el ensamblado de la superficie del reflector parabólico además de las piezas que requerían de modificación adicional para la instalación correcta.

3.1.1. Reflector Parabólico

Las piezas del reflector se dividen en los 12 arcos, o costillas, de aluminio que conforman la estructura que da forma a la superficie parabólica, con un centro de aluminio donde estas 12 piezas se unen con pernos



Figura 3.2: Los 12 arcos de aluminio sujetos al centro del reflector parabólico.

En la figura 3.2 se pueden ver los 12 arcos de aluminio sujetos a los discos de distribución, que además es el punto de anclaje para el soporte de la montura.

Luego se desenrollaron y enderezaron los tubos de aluminio que confirmar los anillos donde se tensaron las mallas metálicas que conforman la superficie del reflector. Con la misma lógica se tomó la cinta de aluminio, que es aproximadamente de 4 mm de espesor, para enderezarla y prepara las perforaciones para los primeros remaches.



Figura 3.3: Los tubos de aluminio y la cinta de aluminio para la tensión de la malla metálica instalados radialmente en los soportes.

3.1.2. Diseño de soportes adicionales

Para poder instalar todos los componentes del telescopio, se debió fabricar soportes personalizados y adicionales para así poder utilizar receptores y elementos que no fueran parte del kit original del fabricante. Con el objetivo de reducir los tiempos de fabricación y prototipado al usar componentes de aluminio o acero se decidió utilizar impresión 3D con filamento plástico PLA¹ de alta resistencia mecánica.

Se diseñaron 6 piezas en total con el software de diseño asistido por computadora o *CAD Fusion 360* de la compañía *Autodesk*. Todos los componentes fueron impresos en PLA de alta resistencia o *Hyper-PLA* de la compañía *Creality*, otorgando una mayor resistencia a la flexión de 50% que el PLA convencional y una elongación de 6.304% en comparación con la del PLA convencional de 3%. La configuración de la impresión fue una altura de capa de 0.2 mm, dada por la boquilla utilizada, 4 capas de muralla y un *Infill* o relleno de 60%.

Una ventaja importante en la elección de la impresión 3D en filamentos plásticos, es su baja incidencia en la deformación o interferencia del comportamiento de radiofrecuencia, al ser un material no conductor introducido en el campo cercano de los componentes.

¹ Explicación PLA

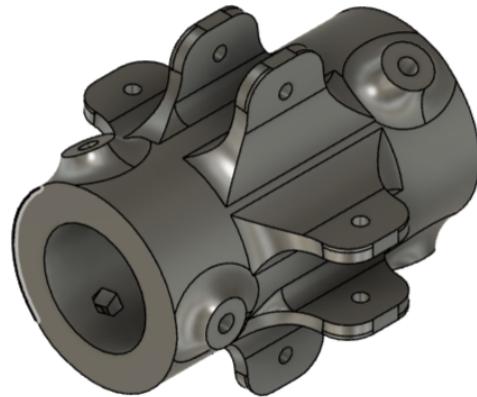


Figura 3.4: Union de los soportes de aluminio para el alimentador.

El diseño 3D de la figura 3.4 es un soporte que contiene una cavidad centrar cilíndrica que cumple la función de sostener tanto el alimentador como el receptor por medio de un tubo plástico de PVC² que asegura que todo se mantenga alineado con el centro de la parábola, además de permitir un movimiento en el eje de la cavidad cilíndrica para ajustar el foco del alimentador.

Tiene 4 ranuras perforadas para asegurar los soportes con pernos M4 de medida y también 6 perforaciones con cavidades para tuercas M5. Con estas tuercas y con los respectivos tornillos se asegura la posición del tubo de PVC para fijar el foco una vez encontrado.

Las siguientes piezas comparten la misma filosofía de diseño, para poder compatible entre ellas y con el resto de los componentes del telescopio. Además, permiten el rediseño de nuevas piezas para otros alimentadores, cambios de largo en el tubo distribuidor de PVC y en la elección de otro material de impresión 3D si se quisiese.

² PVC

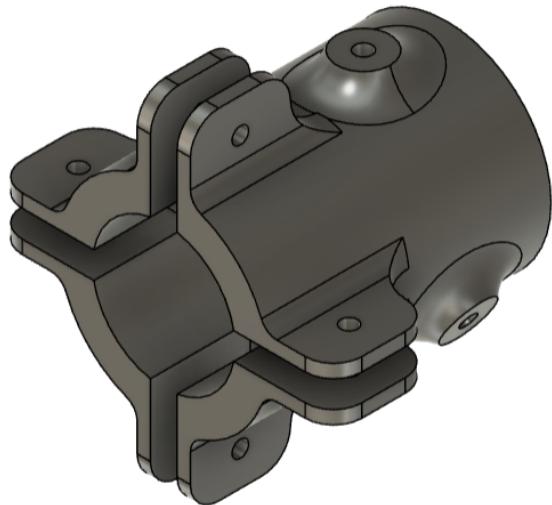


Figura 3.5: Interfaz de soporte para el tubo de distribución y otros elementos

La figura 3.5 es un soporte multipropósito que permite acoplar otros soportes de menor complejidad para ser instalados en la zona del alimentador y receptor. Así permite cambios radicales en la instrumentación que se requiera en el futuro sin tener que rediseñar toda la estructura de sujeción.

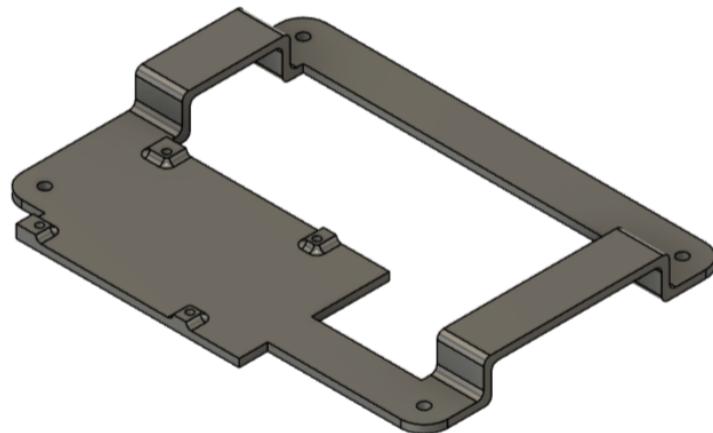


Figura 3.6: Soporte interno para electrónica de recepción

El receptor de radiofrecuencia se encuentra dentro de una caja eléctrica a prueba de agua, pero se requiere un soporte interno para asegurar que la placa de adquisición de datos y el digitalizador no se muevan y se mantengan en su lugar mientras el telescopio se mueve en distintas elevaciones. La figura 3.6 es un soporte que se instala en la caja eléctrica y permite montar diferentes tipos de receptores y amplificadores.

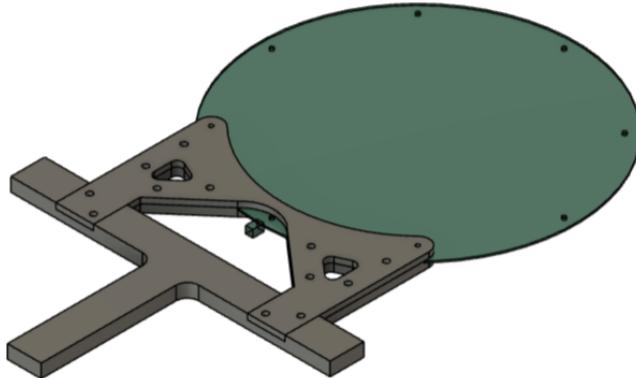


Figura 3.7: Soporte para la fuente de calibración de la copa de agua “estrella artificial”

La figura 3.7 es un soporte que fue diseñado para instalar la fuente de calibración de la copa de agua o “estrella artificial” en parte superior de la copa de agua del cerro Calan. Se divide en 2 piezas que se unen por medio de pernos M4 de plástico para sujetar la antena circular por presión y con tronillos pasantes. Además, para poder asegurar este soporte con facilidad y rapidez, se diseñó la forma de cruz para que por medio de amarras plásticas se pueda asegurar a la baranda de la copa de agua.

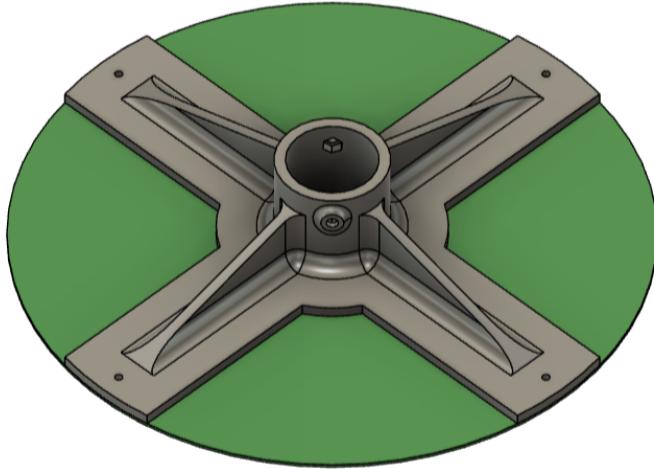


Figura 3.8: Soporte para antena circular de alto ancho de banda para configuración de alimentador

Para las mediciones de baja frecuencia (menores a 600 MHz) se debe utilizar la misma antena circular de la figura 3.7 pero con un soporte diferente. La figura 3.8 es un soporte que permite colocar la antena como alimentador del telescopio por medio del tubo de PVC

y asegurarla con pernos M4 al este y pernos plásticos M3 para la antena y el soporte.

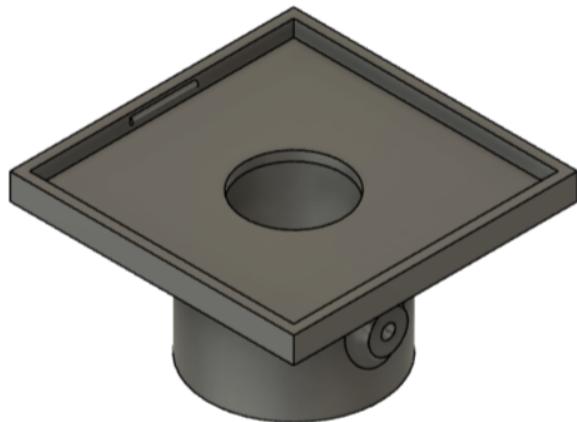


Figura 3.9: Soporte para el dipolo exótico como alimentador de 1420MHz

Al igual que en la figura 3.8, la figura 3.9 es un soporte que permite colocar el dipolo exótico como alimentador del telescopio por medio del tubo de PVC. Diferenciándose del soporte anterior que este diseño permite asegurar la placa de la antena con la deformación forzada del material impreso, evitando el uso de pernos y tuercas.

3.1.3. Montura Alt-Azimutal

El rotor utilizado para la montura alt-azimutal es el modelo *BIG-RAS/HR* de la compañía *RFHamdesign* que está diseñado para soportar una carga de hasta 319 kg, con una velocidad de movimiento de hasta 2.5 grados por segundo y una resolución de 0.1 grados para sus codificadores de posición.



Figura 3.10: Rotor *BIG-RAS/HR* de la compañía *RFHamdesign* instalada en el pedestal con la montura de acero.

En la figura 3.10 se puede ver el rotor instalado en el pedestal de acero con la montura que hace la interfaz entre los motores y el reflector. La montura tiene unos brazos traseros perforados para instalar los contrapesos de equilibrio y compensar el torque que ejerce la masa del reflector. La pieza que une la montura con el rotor es una tubería de acero galvanizado de 46.5 mm de diámetro, cortada a la medida de la montura. Todos los pernos de sujeción son M10 de cabeza hexagonal.



Figura 3.11: Montura de acero con los contrapesos de equilibrio instalados.

En la figura 3.11 se pueden ver los contrapesos de equilibrio instalados en la montura de acero. Los contrapesos son ladrillos de plomo y cemento de 10 kg cada uno. Se instalaron 4 ladrillos en total a una distancia de 78 cm de del eje con la tubería, lugar donde sin ejercer ninguna fuerza sobre la antena o la montura se equilibra con los pernos de sujeción comple-

tamente desajustados.

La montura es capaz de moverse en 400 grados en azimut y 180 grados en elevación, con un rango de movimiento de -40 a 360 en los motores horizontales y de 0 a 180 para los motores verticales. Los cuales para mantener rangos de seguridad la montura se mueve entre 0 a 180 grados en azimuth y elevación, así se minimiza el riesgo de enrollado de los cables al girar. En la sección de software se explicará el funcionamiento del algoritmo de movimiento.

3.1.4. Rack de control

El rack de control se encuentra en el edificio más cercano al telescopio, el edificio del meridiano, donde también se encuentra el telescopio ARTE. El rack consiste en un gabinete de 12 unidades de rack o *U* completamente de acero tanto su cuerpo como la puerta frontal. Con el objetivo de minimizar el RFI que pueda ser introducido por los componentes eléctronicos, se utilizó un gabinete completamente cerrado y con una puerta frontal de acero conectado a la tierra local.



Figura 3.12: Rack de control con el controlador SPID de la montura y el computador de control.

En la figura 3.12 se puede ver el rack de control con los siguientes elementos ordenados de arriba a abajo: el switch de red, el inyector POE³ del receptor, la fuente de alimentación multiple, el controlador de la montura SPID, el computador de control y observación. Estos elementos se encuentran en la sala de recepción de ARTE que cuenta con un sistema de

³ Protocolo de energización por cables ethernet con su sigla en inglés, *POE Power Over Ethernet*

climatización que mantiene la temperatura a 16 grados Celsius constantemente.

3.2. Alimentador

Para el alimentador se evaluaron distintas opciones de antenas según su desempeño de ganancia y ancho de banda. Las frecuencias de operación del telescopio son de 1420 MHz para la banda de hidrógeno y de 300 a 500 MHz para la banda de CHARTS.

Como una de las características de la construcción del telescopio es la capacidad de intercambiar su alimentador con la estandarización de los soportes, se decidió utilizar antenas comerciales que cumplieran con los requerimientos de operación y se acercaran al rendimiento que declara el fabricante para esta superficie.

3.2.1. LPDA de alto ancho de banda

La antena log-periódica de dipolo (LPDA) de alto ancho de banda es una antena que se caracteriza por tener una ganancia de 10 dBi y un ancho de banda de 300 a 6000 MHz. Esta antena se instaló con el elemento más pequeño del arreglo de dipolos en el foco de la parábola. Se orientó verticalmente con respecto al suelo en el telescopio en posición de azimuth y elevación de 0 y 0 grados respectivamente.



Figura 3.13: Antena LPDA de alto ancho de banda instalada en el telescopio.

La antena de la figura 3.13 se instaló en el soporte de la figura 3.8 y se conectó al receptor por medio de un cable coaxial de 50 ohmios y 1.5 metros de longitud.

3.2.2. Dipolo exótico

El dipolo exótico es una antena que forma el arreglo del telescopio ARTE [10] esta antena se caracteriza por tener un ancho de banda de 400 MHz desde 1000 para el diseño impreso instalado en el telescopio. Esta antena tiene una ganancia de 3 dBi y se ubica en el foco de la parábola a 135 cm de la superficie.



Figura 3.14: Dipolo de ARTE instalado en el telescopio.

Esta antena tiene la particularidad de que tiene la ganancia recomendada por el fabricante del reflector para utilizar como alimentador a la distancia de 135 cm. Como se puede ver en la figura 3.14 la antena de PCB se encuentra instalada en el tubo de PVC con el soporte diseñado de la figura 3.9.

3.2.3. Antena circular de alto ancho de banda

Esta antena es la misma que la utilizada en la fuente de calibración de la copa de agua, en este caso se quiso utilizar como alimentador en reemplazo de la LPDA de la figura 3.13. Esta antena tiene una ganancia cercana a 3 dBi, semejante a la del dipolo de ARTE y lo que se recomienda para el reflector. La antena se instala en el soporte de la figura 3.7.

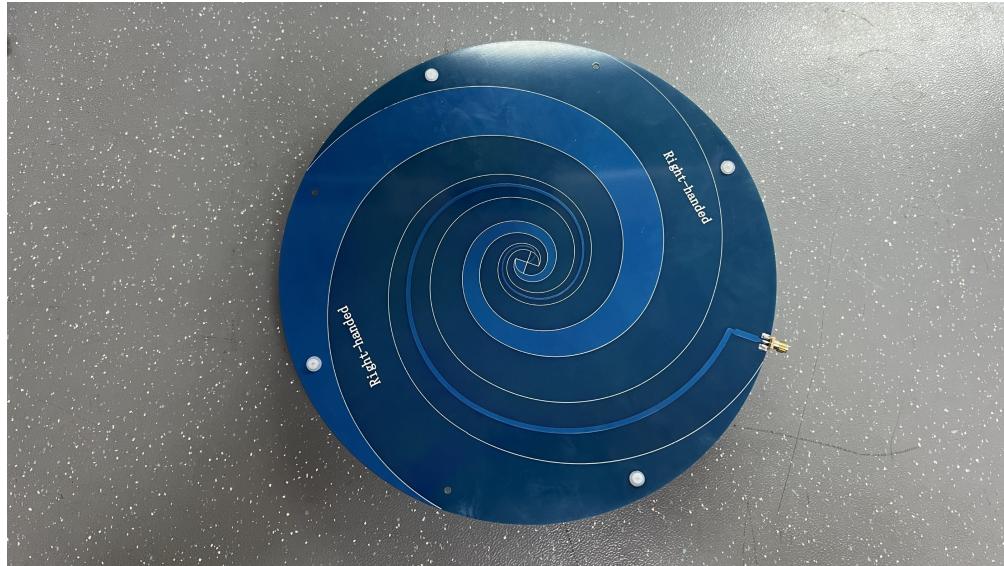


Figura 3.15: Antena circular de alto ancho de banda instalada en el telescopio.

3.3. Diseño del receptor

Para el receptor se optó por utilizar una SDR de bajo costo, un filtro pasabanda optimizado para la observación de la banda de hidrógeno y un amplificador de bajo ruido. Se tomó en cuenta que estos componentes deben no solo ser de alta precisión sino que también robustos, ya que estarán ubicados lo más cerca posible del alimentador a la intemperie.

3.3.1. Cadena de recepción

Para la cadena de recepción cuenta con un empaquetado de un amplificador de bajo ruido de la compañía *Noeelec* que contiene además un filtro pasabanda de 75 MHz de ancho de banda centrado en 1420 MHz. El amplificador tiene una ganancia típica a 1.4 GHz de 35 dB con una figura de ruido de 0.6 dB para la misma frecuencia. Además, este amplificador puede ser alimentado por bias-tee⁴ desde la misma SDR

Poner Imagen

Figura 3.16: Amplificador y filtro pasabanda SAWbird H1 de la compañía *Noeelec*.

En la figura 3.16 se puede ver el amplificador y filtro pasabanda SAWbird H1 de la compañía conectado a un analizador de espectro y una fuente de ruido para la caracterización de la cadena de recepción.

3.3.2. Digitalizador y adquisición

El digitalizador es una RTL-SDR de la organización *RTL-SDR* basado en el chip R820T de *Rafael Micro* que se conecta por USB a un computador para obtener directamente el voltaje complejo de la IF para que sea procesada por el software de adquisición. Este digitalizador tiene una frecuencia de muestreo máxima de 3.2 MS/s y una resolución de 8 bits, pero usualmente se utiliza bajo los 2.56 MS/s para que tenga un comportamiento estable [11].



Figura 3.17: RTL-SDR conectada a la cadena de amplificador y una Raspberry PI 4B.

En la figura 3.17 se puede ver la RTL-SDR conectada a la cadena de amplificador y una Raspberry PI 4B con un *Hat POE*. Se utilizó esta configuración para solo llevar 1 cable ethernet cat 6 por el cual pasaría la energía y los datos. La Raspberry es capaz de alimentar a la SDR que a su vez por medio de su Bias-Tee puede alimentar al amplificador de bajo ruido con la minima cantidad posible de cables y conexiones.

El cable ethernet utilizado es un cat 6 de 25 metros, que va desde el receptor al rack de control. Este cable es del tipo FFTP, lo que quiere decir que cada par trenzado esta recubierto con una laminade aluminio y a su vez los 4 pares trenzados más un conductor de apantallamiento están recubiertos por otra lamina de aluminio que se conecta a tierra en ambos extremos para minimizar el ruido al transportar datos y no producir RFI al telescopio.

3.4. Software de control y adquisición

La infraestructura digital del telescopio se diseñó con un factor principal en mente, que este se pueda operar completamente remoto, por lo que todo el software está hecho para ser operado desde cualquier lugar con acceso a internet. Accediendo a la terminal de control por medio de SSH⁵ y todos sus sistemas están conectados a una red local por medio de ethernet.

El principal lenguaje de programación utilizado para el desarrollo de software fue python, por su simplicidad a la hora de generar entornos virtuales de desarrollo y librerías existentes para utilizar los diversos subsistemas, como por ejemplo, el uso de la librería de *astropy* para los cálculos de seguimiento.

⁵ Secure Shell:

3.4.1. Control de la montura

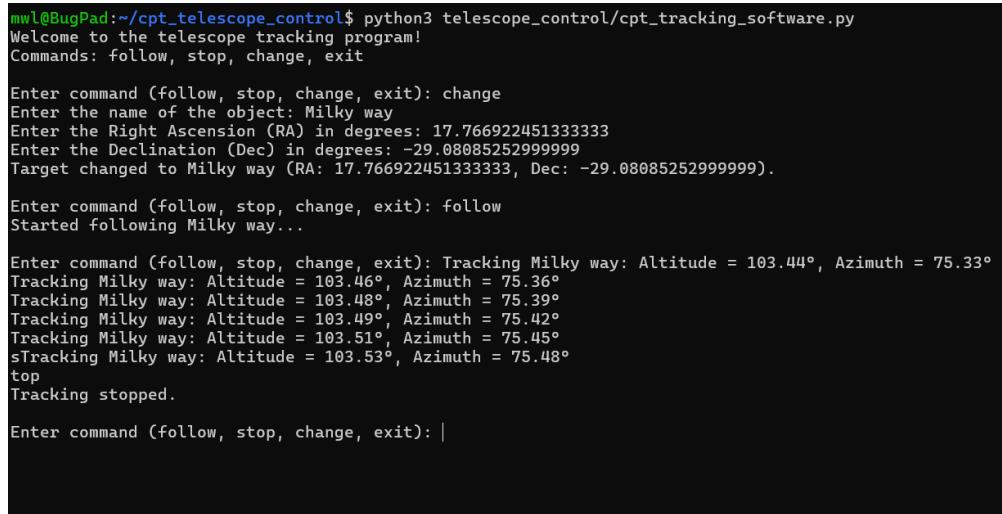
El controlador del rotor requiere una comunicación específica en hexadecimales para moverse y a través del mismo protocolo responde con la posición en la cual se encuentra. Para esto se creó una biblioteca en python basada en el protocolo Rot2Prog [?] que empaqueta y traduce los comandos de movimiento, elevación y azimuth. Esta biblioteca es un archivo de python por el nombre de spid.py, la que es importada para todos los demás códigos de control.

control.py

Es el código principal de control, tiene la capacidad de mandar una posición de azimuth y elevación, de pedir la posición actual de la montura, de reiniciar el controlador en caso de que no responda a los comandos y una de las funciones más importantes es el parado de emergencia de cualquier movimiento.

cpt_traking_software.py

Este es un software más sofisticado que se creó para el seguimiento de cuerpos celestes. A partir de las coordenadas de declinación y ascensión recta, el software calcula la posición de la montura para este astro según la ubicación del telescopio y la hora local.



```
mwl@BugPad:~/cpt_telescope_control$ python3 telescope_control/cpt_tracking_software.py
Welcome to the telescope tracking program!
Commands: follow, stop, change, exit

Enter command (follow, stop, change, exit): change
Enter the name of the object: Milky way
Enter the Right Ascension (RA) in degrees: 17.766922451333333
Enter the Declination (Dec) in degrees: -29.08085252999999
Target changed to Milky way (RA: 17.766922451333333, Dec: -29.08085252999999).

Enter command (follow, stop, change, exit): follow
Started following Milky way...

Enter command (follow, stop, change, exit): Tracking Milky way: Altitude = 103.44°, Azimuth = 75.33°
Tracking Milky way: Altitude = 103.46°, Azimuth = 75.36°
Tracking Milky way: Altitude = 103.48°, Azimuth = 75.39°
Tracking Milky way: Altitude = 103.49°, Azimuth = 75.42°
Tracking Milky way: Altitude = 103.51°, Azimuth = 75.45°
stop
Tracking stopped.

Enter command (follow, stop, change, exit): |
```

Figura 3.18: cpt_traking_software.py en funcionamiento.

En la figura 3.18 se puede ver el software en funcionamiento, con las opciones de cambiar el objeto a seguir *change*, el seguimiento del objeto *follow* y el parado del movimiento *stop*. El software es capaz de invertir la posición de elevación del telescopio para minimizar el movimiento en azimuth y evitar que los cables puedan enrollarse entre sí.

Por ejemplo, si al calcular que la posición del astro en elevación de 50 grados y azimuth de 315, requiere un movimiento de más de 180 grados en azimuth, el software invierte la posición de elevación para que el movimiento sea menor a 180 grados resultando en que el telescopio apunte a 130 grados de elevación y a 135 grados en azimuth. De forma automática, si el astro tiene una elevación menor a los 30 grados, o mayor a 150 grados en la inversión, este

deja de seguir el astro ya que a esta elevación la interferencia de radio es muy notoria en las observaciones por efectos atmosféricos y cada vez entra en la línea de vista elementos de comunicaciones inalámbricas terrestres.

3.4.2. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se crearon 2 softwares en python para esta tarea, uno para adquirir una acumulación de espectros para las observaciones de un objeto celeste y otro para la calibración del instrumento.

rtl_spectra.py

Es un script que utiliza la radio RTL-SDR para obtener espectros mediante un comando específico, este se utiliza principalmente para las caracterizaciones y las mediciones. Se usa en conjunto con el software de control para crear las variantes de medición de patrón de radiación. Se puede configurar la tasa de datos, el tamaño de la FFT, la cantidad de espectros tomados y el formato de guardado.

cpt_rtl_adquisition.py

Es el software de observación, el cual tiene un *Ring buffer* o un acumulador de espectros flotantes, esto quiere decir que, según como se configure, puede acumular una cantidad de espectros que se van actualizando constantemente con nuevos espectros y eliminando los viejos en la ventana de tiempo que se requiera o en lo que la memoria pueda guardar.

Al igual que el script anterior este se puede configurar para la tasa de datos, el tamaño de la FFT, la cantidad de espectros tomados y el formato de guardado. Este, por otra parte, está diseñado para obtener una gran cantidad de espectros para ser guardados en una estructura eficiente en espacio en código binario. También tiene la tarea de mostrar en tiempo real la acumulación promediada de los espectros y en paralelo obtener las muestras y agregarlas al ring-buffer.

3.5. Infraestructura de caracterización

Para caracterizar el telescopio se requieren de una serie de instrumentos y elementos que permitan obtener los datos necesarios para la calibración y la verificación de los resultados obtenidos.

3.5.1. Fuente de calibración

Ya que el campo lejano de las antenas eléctricamente grandes, como es el caso de una antena de apertura, para medir el patrón de radiación en potencia de una antena se requiere de una fuente de radiofrecuencia conocida a una distancia mayor a la de campo lejano de la antena que se quiere medir.

Para esto se instaló una antena de alto ancho de banda (192 MHz a 8 GHz) en la copa de agua del cerro Calán, con un cable coaxial de 20 metros de longitud. Al dejar la antena instalada en la parte superior y pudiéndose instalar generadores de señales desde la parte inferior. A esta antena le llamamos la “estrella artificial”.



La antena de la estrella artificial se encuentra a una altura de 15 metros sobre el suelo y a 186 metros de la antena del telescopio. La antena de la estrella artificial es una antena de polarización circular de alto ancho de banda con una ganancia de 3 dBi aproximadamente.

La línea de vista de la antena se encuentra totalmente despejada, manteniendo la primera zona de Fresnel libre de obstáculos para las frecuencias de interés.

Como generador de señales se utilizó un generador Valon 5008 con una salida de 2.23 dBm a 1428 MHz y a 400MHz. Además se le instaló un filtro pasabajo para minimizar la presencia de los armónicos de alta frecuencia evitando la generación innecesaria de RFI.



Figura 3.20: Generador de señales Valon 5008 con filtro pasabajo con una batería externa.

El generador de la figura 4.2.a se conecta a la antena de la estrella artificial por medio de un cable coaxial de 20 metros de longitud y se alimenta por una batería externa de 5 V. Se programa previamente la frecuencia a la que se requiera para las mediciones.

3.5.2. Fuente de ruido

Para realizar medición de la temperatura de ruido se requirió de una fuente de ruido. Para obtener la temperatura de la cadena de recepción se utilizó una fuente de ruido Agilent 346B con una alimentación de 28 V.



Figura 3.21: Fuente de ruido Agilent 346B.

3.5.3. Software de caracterización

cpt_rp_measure.py

Es un software que al igual que los de la sección 3.4 obtiene espectros y los guarda para el análisis futuro. La diferencia es que este software está diseñado para la calibración del instrumento, por lo que además este instrumento guarda los espectros tomados por ángulo con respecto a la estrella artificial de la copa de agua para las mediciones de patrón de radiación.

Este script genera un archivo con los espectros tomados por ángulo y luego mueve la montura a otro ángulo para tomar otro espectro, este proceso se repite hasta que se obtienen un corte de 180 grados con la cantidad de espectros que haya sido configurada.

Como la fuente de calibración se encuentra en altura, hay que ajustar el plano de rotación con respecto a plano azimutal de la montura, para esto se utilizó la siguiente conversión de coordenadas:

$$\theta' = \theta + \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) E \quad (3.1)$$

$$\phi' = \phi \quad (3.2)$$

Donde θ es la elevación original, E es el ángulo de elevación de la estrella artificial con respecto a la antena, ϕ es el azimut, θ' y ϕ' son las nuevas coordenadas. Con esta conversión se tiene una elevación específica para cada punto de azimut que permite mantener el plano de rotación de la fuente de calibración en el nuevo plano de azimutal.

cpt_siglent.py

Es un software que utiliza de manera remota el instrumento Siglent SVA1075X para obtener sus espectros y realizar las mismas mediciones de patrón de radiación que el software anterior.

Capítulo 4

Caracterización y puesta en servicio

En este capítulo se expondrán los procesos de caracterización y puesta en servicio del telescopio CPT. Para abordar los puntos de caracterización y primera luz de los objetivos propuestos para este trabajo. Se detallarán los aspectos considerados para cada una de las mediciones y los fundamentos correspondientes.

4.1. Enfoque del alimentador

Se realizaron 2 mediciones de enfoque del alimentador, una a 70 metros y otra a 186 metros. Para la primera medición se utilizó un generador de señales genérico con una LPDA de bajo ancho de banda. Luego para el resto de las mediciones se utilizó la estrella artificial de la copa de agua de la sección XX.

4.1.1. Alimentador sin soportes a 70 metros

En un principio el alimentador del telescopio consistía en una antena LPDA (Log Periodic Dipole Array) de 296 MHz a 6 GHz, de ultra ancho de banda, con una ganancia de aproximadamente 9 dBi. Con el receptor instalado en esta antena, se procedió a realizar el enfoque del alimentador. Para esta etapa se retiró el soporte tetrápodo y se instaló el alimentador en un trípode auxiliar sostenido por un tubo de PVC para lograr la altura del centro del reflector de 2 metros.



Figura 4.1: Antena LPDA en trípode auxiliar a 2 metros de altura.

Con la antena de la figura 4.2.b se procedió a realizar el enfoque del alimentador. La medida consistió en mover el alimentador en el eje Z, es decir, en la dirección de la apertura del reflector. A una distancia de 70 metros desde el reflector se instaló sobre otro trípode un generador de señales portátil con otra LPDA de menor ancho de banda.



(a) Generador de señales portatil con la antena orientada hacia el reflector a 70 metros. (b) Antena LPDA de menor ancho de banda instalada con el generador de señales en tripode.

El generador de señales se configuró a una frecuencia de 1000 MHz y se disparó constantemente el tono en dicha frecuencia. Se instaló a una distancia de 70 metros dentro del parque cerro Calán con la consideración de un campo lejano de 60.5 metros a 1000 MHz para el tamaño del reflector, por lo que este generador se encontraba a dicha distancia del reflector.



Figura 4.3: Distancia de 70 metros entre el reflector y el generador de señales con elevaciones similares.

En la figura 4.3 se muestra la distancia aproximada de 70 metros, tomando 10 metros de distancia adicional para asegurar el campo lejano a dicha frecuencia. Se alineó visualmente la antena del generador con el reflector a la distancia, la que se encontraba parcialmente con una línea de vista obstaculizada por árboles y arbustos.

Para efectos de la medición, como se necesitaba encontrar un punto aproximado de enfoque, la exactitud de esta medición no fue crítica. Se procedió a mover el alimentador en el eje Z, es decir en la dirección de la apertura del reflector, hasta encontrar el punto donde la señal del generador era máxima.

La potencia recibida por el receptor fue medida con el software de medición utilizando la RTL-SDR guardando los espectros para distancias de 5 cm en 5 cm. Se midió la razón señal a ruido y se obtuvo el punto de máxima potencia recibida en dBFS. Medidas que luego fueron calibradas en dBm por la medición de sensibilidad.

4.1.2. Alimentador con soportes con la estrella artificial

Para la medición de enfoque con la estrella artificial se instaló el soporte tetrápolo y se colocó el alimentador en su posición final después de las mediciones anteriores. Se configuró el generador de señales Valon de la estrella artificial a 1428 MHz. Se utilizó esta nueva frecuencia para evitar interferencia de radiofrecuencia en la medición, utilizando el filtro delgado de H1.



Figura 4.4: Distancia de 188 metros entre el reflector y la estrella artificial de la copa de agua.

Para el caso de 1428 MHz, la distancia de campo lejano era de 85 metros y la estrella artificial de la figura 4.5 se encontraba a 188 metros, estando perfectamente en el campo lejano del reflector. Además la alineación con el reflector se realizó con el control automático de la montura alt azimutal y la línea de vista se encontraba completamente libre para la primera zona de Fresnel.

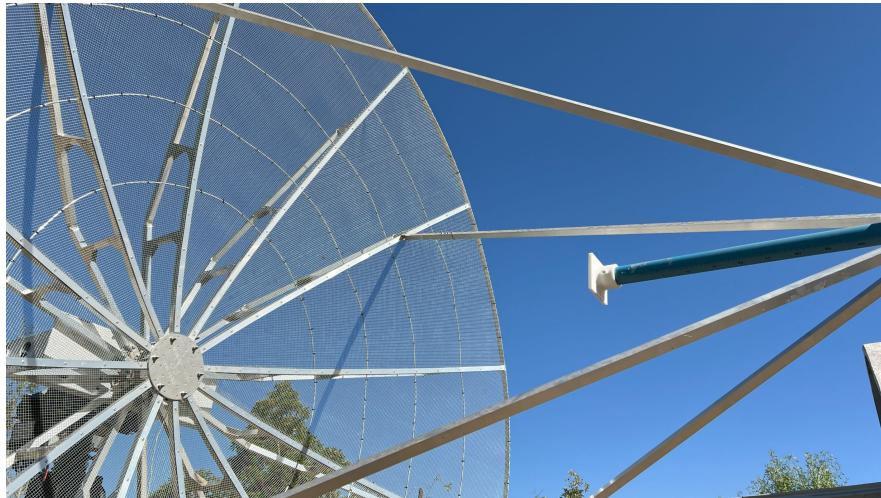


Figura 4.5: Alimentador dipolo exótico con tetrápodo instalado.

En la figura 4.5 se muestra el alimentador con el tetrápodo instalado y un tubo PVC milimetrado para medir la distancia relativa al reflector, usando de referencia el punto donde los soportes se unen al tubo del alimentador.

Para esta medición de enfoque, se movió el alimentador en el eje Z con una resolución de 0.5 cm hasta encontrar el punto de máxima potencia recibida. Se midió la razón señal a ruido y

se obtuvo el punto de máxima potencia recibida en dBFS al igual que en la medición anterior.

4.2. Medición del patrón de radiación

Se utilizaron 2 plataformas para la medición del patrón de radiación, una con la medida relativa dBFS obtenida de los espectros de la RTL-SDR y otra con la medida absoluta en dBm obtenida con el analizador de espectros Siglent SVA1075x. Para todas las mediciones se utilizó la estrella artificial de la copa de agua.

Todas las mediciones de patrón de radiación se realizaron en la cima del cerro Calán, en la plataforma de observación del telescopio CPT. Para cada frecuencia medida, se hicieron los cortes azimutales y de elevación, o la medida del campo H y el campo E. Todos los cortes de 180 grados para obtener con claridad los lóbulos laterales y con una resolución de 1 punto por grado.

4.2.1. Medición relativa para banda de H1

La medición con la RTL-SDR se realizó a 1428 MHz, utilizando el filtro angosto de la misma frecuencia de *RadioastronomySuplies*. El generador Valon, se configuró a 1428 MHz con una potencia inyectada a la estrella artificial de 0.23 dBm.

Las perdidas ohmnicas del cable coaxial RG316 a 1428 MHz son de 10.5 dB por 10 m, como el cable que alimenta la antena de la copa de agua es de 20 metros, se obtuvó una perdida de 21 dB. La potencia recibida por la antena es de -21 dBm aproximadamente.

Con los softwares de medición se obtuvieron los espectros de la señal recibida por la RTL-SDR, se midió la razón señal a ruido y se guardaron 1000 espectros para cada grado de elevación y azimuth. Como la copa de agua se encuentra en altura, se generó un plano semicircular elevado en 7 grados sobre el eje horizontal, donde se corrigieron los valores de elevación por ángulo azimutal con la ecuación de corrección 2.7. Para el segundo corte, se generó un desfase de 7 grados en elevación, y para medir de 0 a -90 grados, se invirtió la posición azimutal en 180 grados para obtener ese cuadrante.

4.2.2. Medición absoluta para todas las bandas de interés

4.3. Sensibilidad y temperatura de ruido

La medida de sensibilidad se realizó inyectando un tono para cada frecuencia de interés en la entrada de la cadena de recepción. Se utilizó el generador de señales *Rode & Schwartz SMB100A* con una potencia de salida de -80 dBm y un coaxial RG316 de 10 metros al receptor instalado en el foco de la antena. Se midieron los espectros generados por la RTL-SDR para determinar la escala dBFS de la radio y calibrar los demás espectros en potencia.

Se guardaron los espectros de 300 MHz, 400 MHz y 500 MHz para cubrir la banda de interés del proyecto CHARTS. También se guardaron los espectros de 1000 MHz, 1428 MHz,

1500 MHz y el límite de digitalización de 1700 MHz.

4.3.1. Medición de la temperatura de ruido

Para medir la temperatura de ruido y por ende la figura del receptor, se utilizó la fuente de ruido Agilent 346B con una amplificación de 40dB. Para la cadena de amplificación se utilizó el LNA + Filtro H1 SAWbird+ H1 de Nooelec, el cual se conectó a la fuente de ruido y se midió la potencia de ruido en la salida en el analizador de espectro.

Para la temperatura de ruido del receptor, se inyectó la señal de ruido en la entrada del receptor y se midió la potencia de ruido con los espectros de la RTL-SDR en la banda de interés.

Para obtener la temperatura del sistema completo se realizó una acumulación de espectros del centro de la galaxia a 1420 MHz y a una región del cielo limpia en concentración de hidrógeno neutro. Consultando a los catálogos de radioastronomía se obtuvo la temperatura de la galaxia y de la región del cielo.

Con cada una de estas mediciones se realizó el cálculo de temperatura de ruido con el método de Y-factor y se obtuvo la figura de ruido de la cadena de amplificación, del receptor y del sistema.

4.4. Medicion del error de apuntamiento

4.5. Primera luz

Para la primera luz, se escogió el centro de la galaxia por varias razones. La primera es que se trata de fuente de radio muy fuerte, fácil de detectar y es bastante estudiada y catalogada. La segunda razón es que para la época de medición en los meses de noviembre, diciembre y enero, el centro de la galaxia se encuentra bastante cerca del zenith para la latitud de Santiago, lo que facilita la observación.

El centro de la galaxia tiene una ascension recta de 17 h 45 m 40 s y una declinacion -29°00'28", coordenadas que son ingresadas en el software de control de la montura alt azimutal. Se acumularon espectros por períodos de 2 horas durante 3 días, desde las 10 am hasta las 6 pm, para obtener la máxima cantidad de datos posibles. También se descartaron algunas observaciones donde el sol se encontraba muy cerca del centro de la galaxia, para evitar la saturación del receptor.

Para la observación se configuró el telescopio con el receptor de H1 y con la antena dipolo exótico en el foco geométrico del reflector. Se obtuvieron los espectros de la RTL-SDR y se guardaron en el disco duro para su posterior análisis.

Capítulo 5

Analisis de Resultados

La construccion de la antena finalizo con todas las partes mecanicas y electronicas ensambladas. A continuacion se presentan los resultados obtenidos en la caracterizacion de la antena.

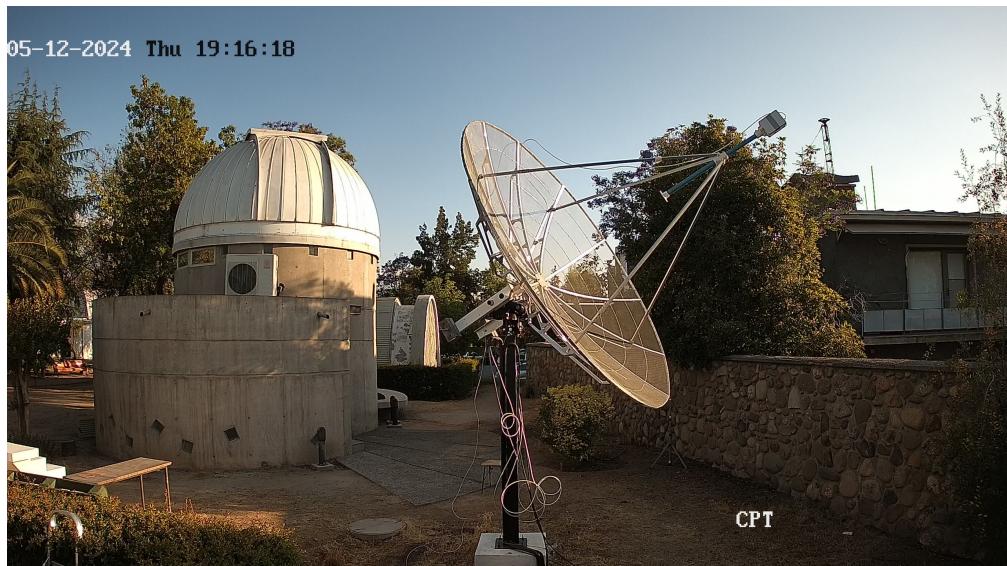


Figura 5.1: Antena construida siendo monitoriada por la camara remota

5.1. Posicion del alimentador

La posicion del alimentador con mayor ganancia se obtuvo a 135 cm de la superficie del reflector. La figura ?? muestra la ganancia en funcion de la distancia del alimentador al reflector.

La distancia obtenida coincide con la disatncia focal de la antena y se observa que la a medida que el alimentador se aleja del foco, aumentando o disminullendo la distancia con la parabola, la ganancia disminulle drasticamente perdiendo 6 dB por centimetro hasta llegar a la ganancia que tendria la antena sin considerar el reflector.

Estas perdidas se aprecian de la misma manera tanto para la frecuencia de 1428 MHz como para la de 400 MHz.

5.2. Patrón de radiación

A continuacion se presentan los patrones de radiacion obtenidos para la antena a 1428 MHz y 400 MHz. Para la banda de 1428 MHz se realizaron los 2 cortes de elevacion y azimut ya que este se obtuvo utilizando el digitalizador del receptor, lo que permite hacer las maniobras de elevacion completas. En cambio para 400 MHz, se debia utilizar un cable coaxial hacia el analizador de espectro.

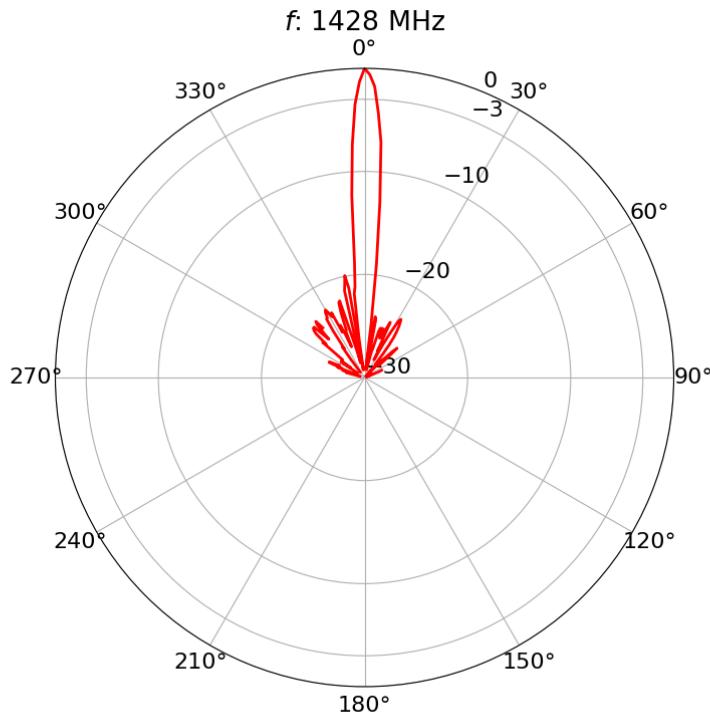


Figura 5.2: Corte azimutal patrón de radiación a 1428 MHz

En la figura 5.2 se observa el corte azimutal del patrón de radiación a 1428 MHz, donde se aprecia un lóbulo principal predominante de 4.5 grados de HPBW y todos los demás lóbulos laterales bajo -20 dB.

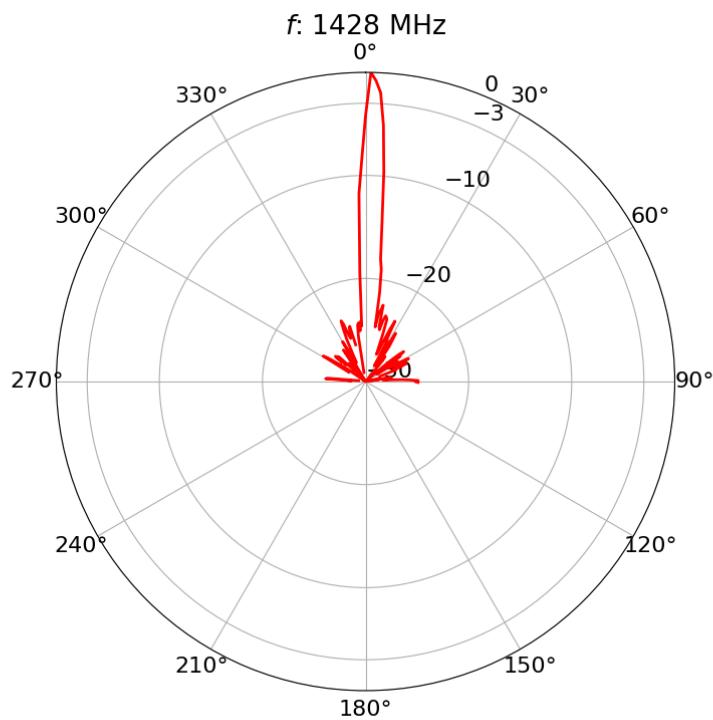


Figura 5.3: Corte elevacion patrón de radiación a 1428 MHz

Con respecto al corte de elevacion, de la figura 5.3, se observa un lobulo principal de 3.5 grados de HPBW y una discontinuidad en el lobulo principal a 0 grados. Los lobulos laterales se encuentran por debajo de -25dB.

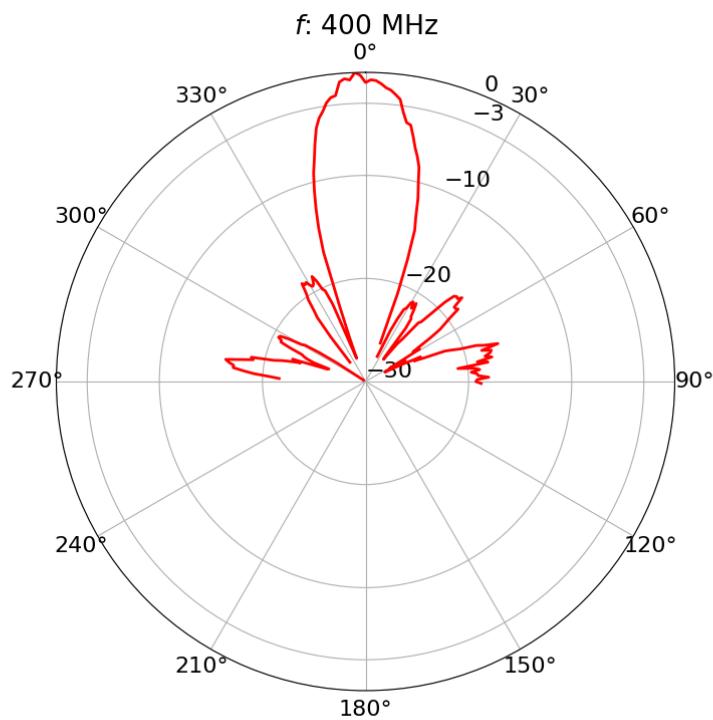


Figura 5.4: Patrón de radiación a 400 MHz

- 5.3. Ganancia y Directividad**
- 5.4. Sensibilidad**
- 5.5. Error de apuntamiento**
- 5.6. Ancho de banda**
- 5.7. Primera luz**

Capítulo 6

Conclusiones

El trabajo de puesta en servicio del telescopio CPT logró cumplir con los objetivos propuestos, destacando la capacidad de observar la línea espectral de hidrógeno neutro, validando su propósito como instrumento de radioastronomía. Las etapas de caracterización permitieron demostrar un rendimiento adecuado en términos de sensibilidad, patrón de radiación y ganancia para un telescopio de estas características. Este éxito da inicio a la vida útil como un nuevo instrumento científico listo para futuras observaciones.

Se comisionó un radiotelescopio con tecnologías accesibles y de bajo costo, como las radios definidas por software (SDR). Se pudo desarrollar un sistema de 16348 canales espectrales a una frecuencia de muestreo de 2.048 MS/s obteniendo parámetros operacionales que se condicen con la teoría para estas condiciones, ganancia de 31.5 dBi para 1 GHz, un piso de ruido de 135 dBm sin utilizar criogenia.

Con un nuevo radiotelescopio en servicio, se espera poder representar una contribución significativa a las iniciativas científicas y educativas de nuestra comunidad científica y universitaria, ofreciendo un instrumento versátil, para la investigación y formación de estudiantes. Además, su diseño adaptable permite que se pueda operar en nuevas bandas de interés y colaborar con otros proyectos con diferentes propósitos científicos.

Finalmente, el telescopio CPT se convierte en un nuevo recurso clave para nuevas colaboraciones internacionales, destacando el proyecto CHARTS, que busca estudiar las ráfagas rápidas de radio (FRB) y otros fenómenos astrofísicos. En este contexto, se recomienda continuar con la optimización del receptor y su alimentador, para ampliar su rango de frecuencias de operación y fortalecer la infraestructura digital para adquirir mejores observaciones y estudios más complejos.

6.1. Trabajos Futuros

Para los trabajos futuros se recomienda la integración de un receptor a base de FPGA, como una RFSoC, para mejorar la capacidad de procesamiento de señales y la adquisición de datos. Esto permitirá la implementación de técnicas de interferometría y la detección de señales de radio más débiles. También se recomienda la integración de un sistema de control centralizado pensado en las capacidades de observación remota.

Se debe continuar con el desarrollo de un mejor alimentador, con técnicas de diseño de antenas más avanzadas, para mejorar el desempeño de radiofrecuencia y la disminución de los tiempos de mantenimiento para cambiar de banda de observación de interés.

Finalmente, se recomienda la integración de soluciones para mejorar la robustez del sistema y la capacidad de operación en condiciones climáticas adversas, como la instalación de un sistema de enfriamiento activo para la cadena de recepción y métodos de calibración automatizados.

Bibliografía

- [1] Condon, J. y Ransom, S., Essential Radio Astronomy. Princeton Series in Modern Observational Astronomy, Princeton University Press, 2016, <https://books.google.cl/books?id=vWWYDwAAQBAJ>.
- [2] Alvarado, P. A., “Medición del patrón de radiación del telescopio mini”, 2014, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116317>.
- [3] Stutzman, W. y Thiele, G., Antenna Theory and Design. Antenna Theory and Design, Wiley, 2012, <https://books.google.cl/books?id=xhZRA1K57wIC>.
- [4] Friis, H., “A note on a simple transmission formula”, Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946, [doi:10.1109/JRPROC.1946.234568](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568).
- [5] Finger, R. A., Design and construction of a digital sideband separating spectrometer for the 1.2-meter southern radio telescope. Tesis PhD, 2013.
- [6] National Radio Astronomy Observatory (NRAO), “Radio telescopes - national radio astronomy observatory”, 2024, <https://public.nrao.edu/telescopes/radio-telescopes/>.
- [7] Óscar Restrepo Gaitán, “Desarrollo de tecnologías y metodologías para mejorar la observación de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro”, 2023, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/198618>.
- [8] RF Hamdesign, “3 meter parabolic dish kit”, 2024, <https://www.rfhamdesign.com/products/parabolicdishkit/3meterdishkit/index.php>.
- [9] Analog Devices, “Noise figure measurement methods and formulas – maxim integrated”, 2024, <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/noise-figure-measurement-methods-and-formulas--maxim-integrated.html>.
- [10] Gallardo, D., “Diseño y medición de un arreglo de antenas para la detección de frbs galácticos”, octubre 2023. Reporte EL7850.
- [11] RTL-SDR Blog, “Cheap and easy hydrogen line radio astronomy with an rtl-sdr, wifi, parabolic grid dish, lna and sdrsharp”. RTL-SDR Blog, 2018, <https://www.rtl-sdr.com/cheap-and-easy-hydrogen-line-radio-astronomy-with-a-rtl-sdr-wifi-parabolic-grid-dish-lna-and-sdrsharp/>. Online.