



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 CUROTT MOLINA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
NOMBRE INSTITUCIÓN

SANTIAGO DE CHILE  
2024

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

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

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

*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

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
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
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
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. Ecuacion 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 . . . . .	13
2.3.2. Transformada Rápida de Fourier . . . . .	13
2.4. Radiotelescopios . . . . .	13
2.4.1. ¿Qué es un radiotelescopio? . . . . .	13
2.4.2. Línea de Hidrógeno Neutro . . . . .	13
2.4.3. CHARTS y FRB . . . . .	13
2.5. Telescopio CPT . . . . .	13
2.6. Metodos de caracterización . . . . .	14
2.6.1. Medicion de patrón de radiación . . . . .	14
2.6.2. Medición de sensibilidad . . . . .	14
2.6.3. Medicion de la temperatura de ruido . . . . .	14
2.7. Estado del arte . . . . .	14
<b>3. Ensamblaje e instrumentacion</b>	<b>15</b>
3.1. Ensamblado Mecánico . . . . .	15

3.1.1. Reflector Parabólico . . . . .	16
3.1.2. Diseño de soportes adicionales . . . . .	17
3.1.3. Montura Alt-Azimutal . . . . .	20
3.1.4. Rack de control . . . . .	20
3.2. Alimentador . . . . .	20
3.3. Diseño del receptor . . . . .	20
3.3.1. Cadena de recepción . . . . .	20
3.3.2. Digitalizador y adquisición . . . . .	20
3.4. Software de control y adquisición . . . . .	20
3.4.1. Control de la montura . . . . .	20
3.4.2. Adquisición de datos . . . . .	20
3.5. Infraestructura de caracterización . . . . .	20
3.5.1. Fuente de calibración . . . . .	20
3.5.2. Fuente de ruido . . . . .	20
3.5.3. Software de caracterización . . . . .	20
<b>4. Caracterización y puesta en servicio</b>	<b>21</b>
4.1. Enfoque del alimentador . . . . .	21
4.1.1. Alimentador sin soportes a 70 metros . . . . .	21
4.1.2. Alimentador con soportes con la estrella artificial . . . . .	23
4.2. Medicion del patrón de radiación . . . . .	24
4.2.1. Medicion relativa para banda de H1 . . . . .	24
4.2.2. Medicion absoluta para todas las bandas de interes . . . . .	25
4.3. Sensibilidad y temperatura de ruido . . . . .	25
4.3.1. Medicion de la temperatura de ruido . . . . .	25
4.4. Medicion del error de apuntamiento . . . . .	26
4.5. Primera luz . . . . .	26
<b>5. Analisis de Resultados</b>	<b>27</b>
5.1. Posicion del alimentador . . . . .	27
5.2. Patrón de radiación . . . . .	27
5.3. Ganancia y Directividad . . . . .	27
5.4. Sensibilidad . . . . .	27
5.5. Error de apuntamiento . . . . .	27
5.6. Ancho de banda . . . . .	27
5.7. Primera luz . . . . .	27
<b>6. Conclusiones</b>	<b>28</b>
6.1. Trabajos Futuros . . . . .	28
<b>Bibliografia</b>	<b>29</b>

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Parámetros del patrón de radiación para una antena con características directivas. [3]. . . . .	4
2.2.	Polarizacion lineal de una onda electromagnetica propagandose en el eje Z. . . . .	7
2.3.	Polarizacion circular de una onda electromagnetica propagandose en el eje Z. . . . .	7
2.4.	Diagrama de bloques de un sistema de parametros S. . . . .	8
2.5.	Ancho de banda de reflexion 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> . . . . .	12
3.1.	Herramientas utilizadas para el ensamblado de la superficie del reflector parabólico. . . . .	16
3.2.	Los 12 arcos de aluminio apernados al centro del reflector parabólico. . . . .	16
3.3.	Los tubos de aluminio y la cinta de aluminio para la tensión de la malla metálica instalados radialmente en los soportes. . . . .	17
3.4.	Union de los doportes de aluminio para el alimentador . . . . .	18
3.5.	Interfaz de soporte para el tubo de distribucion y otros elementos . . . . .	19
3.6.	Soporte interno para electronica de recepción . . . . .	19
4.1.	Antena LPDA en tripode auxiliar a 2 metros de altura. . . . .	22
4.3.	Distancia de 70 metros entre el reflector y el generador de señales con elevaciones similares. . . . .	23
4.4.	Alimentador dipolo exotico con tetrapodo isntalado. . . . .	24

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La construcción de un nuevo instrumento de observación astronómica conlleva diversos desafíos, oportunidades y nuevos conocimientos. Por lo que el posicionamiento un nuevo radiotelescopio de 3 metros de diámetro es un proyecto que involucra distintos aspectos mecánicos, electrónicos, de radiofrecuencia o RF y de software. Para asegurar un funcionamiento correcto y poder realizar observaciones astronómicas para aportar a nuestros astrónomos y a la comunidad científica.

En la cumbre del Cerro Calan, en la ciudad de Santiago, se encuentra 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 fuertes en el espectro de radio y es una de las más estudiadas.

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 pa-

rabólico, 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**

Las motivaciones que inspiraron la memoria incluyen la ayuda a la comunidad científica en los estudios cosmológicos y de radioastronomía, entregar nuevas herramientas para la investigación de los astrónomos de la universidad y los atractivos bajos costos que conllevan el diseño a construir.

## **1.3. Objetivos Específicos**

### **1.3.1. Ensamblado Mecánico**

Completar el ensamblado del 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 y construir la electrónica de adquisición para las frecuencias de interés.

### **1.3.3. Primera Luz y Caracterización**

Lograr 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 conceptos principales características de las antenas, ya 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 utilizadas 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 las mismas 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. 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  $\lambda$  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:

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

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

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

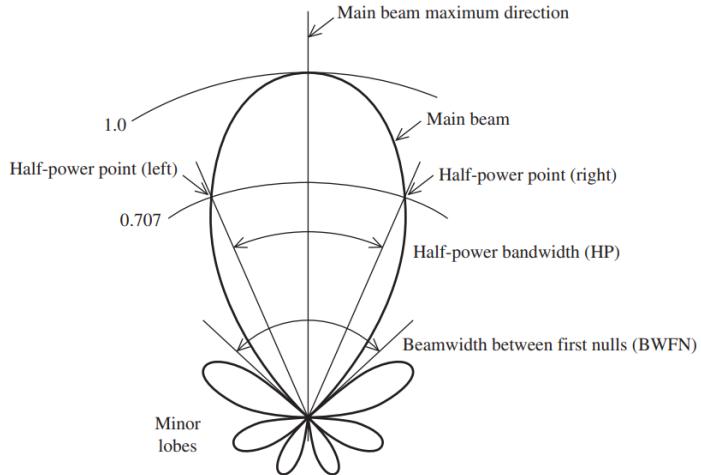


Figura 2.1: Parámetros del patrón de radiación para una antena con características directivas. [3].

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  $U_{\text{prom}}$  es la densidad de potencia promedio. Lo que da a entender que la directividad es comúnmente 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  $R$ .

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

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 perdidas de la superficie, las cuales se denominan como eficiencia de la apertura y eficiencia de la superficie respectivamente.

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

Donde  $e_r$  es la eficiencia de la radiacion,  $\varepsilon_t$  es la eficiencia *taper* o de covertura,  $\varepsilon_s$  de *spillover* o de derrame e  $\varepsilon_a$  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 fisica 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  $\lambda$  es la longitud de onda.

#### 2.1.4. Polarización

La polarizacion de una antena es la polarizacion 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: Polarizacion lineal de una onda electromagnetica propagandose en el eje Z.

Los tipos de polarizacion se dividen en polarizacion lineal, polarizacion circular y la combinacion de ambas, la polarizacion eliptica. La figura 2.2 muestra una onda electromagnética linealmente polarizada en orientacion vertical.

## Poner Imagen

Figura 2.3: Polarizacion circular de una onda electromagnetica propagandose 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 el cual una antenna opera con su mejor eficiencia se le denomina como ancho de banda. El ancho de banda se define considerando los parametros de reflexion y de radiacion de potencia, siendo el parametro comunmente utilizado los parametros de reflexion  $S_{11}$  y transmision  $S_{21}$  para esta caracterizacion.

Los parametros S son los que definen la respuesta de un medio a una onda electromagnetica, en este caso, la respuesta de la antena a una onda electromagnetica. Existen los parametros  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  y  $S_{22}$ , donde  $S_{11}$  es el parametro de reflexion,  $S_{12}$  es el parametro de transmision,  $S_{21}$  es el parametro de transmision inversa y  $S_{22}$  es el parametro de reflexion inversa.

## Poner Imagen

Figura 2.4: Diagrama de bloques de un sistema de parametros S.

La figura 2.4 muestra las diferentes configuraciones para lograr la obtencion de los parametros S.

### Ancho de banda $S_{11}$

El ancho de banda de reflexion se define como el rango de frecuencia en el cual el parametro de reflexion  $S_{11}$  es menor a un valor especifico, comunmente -10dB. 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 reflexion de una antena.

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

### Ancho de banda $S_{21}$

El ancho de banda de transmision se define como el rango de frecuencia en el cual el parametro de transmision  $S_{21}$  es mayor a un valor specifico, comunmente lo más cercano a 0 posible, sin embargo cuando se utilizan componentes activos como cadenas de amplificacion, este valor suele aumentar de 0dB, 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 definido en la figura de una cadena de recepcion o transmision.

### 2.1.6. Perdidas y eficiencia

En la propagacion de ondas electromagnéticas se producen perdidas de varias fuentes, las relacionadas con el medio de propagacion son las perdidas de espacio libre y las perdidas ohmicas, pero en el contexto de una antena de apertura de reflector parabolico, encontramos tambien las perdidas de superficie y las perdidas de alimentacion.

#### Impedancia de entrada

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

Como practica comun, se busca que la impedancia tanto de salida como entrada de los elementos de un sistema de RF sea de  $50\Omega$ , pero tambien existen otros estandares de impedancia como los utilizados en sistemas de television e internet, los cuales estan estandarizados

a  $75\Omega$ .

No todas las antenas una vez construidas tienen una impedancia intrínseca de  $50\Omega$ , por lo que se deben utilizar elementos de adaptación de impedancia para lograr la mejor transferencia de potencia, estos elementos se les conoce como *baluns*.

### Perdidas de espacio libre

Las perdidas de espacio libre son las perdidas asociadas a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio. Estas perdidas 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  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal.

### Perdidas de superficie

Las perdidas de superficie están asociadas al término de eficiencia de superficie de las antenas de apertura. Estas perdidas se deben a las imperfecciones en la superficie en relación a la longitud de onda de la señal. Lo que se puede entender como 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.

### Perdidas Ohmáticas

Las perdidas ohmáticas son las perdidas asociadas a la resistencia de los materiales conductores de la antena. Estas perdidas 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, algo que es un factor a considerar en la construcción de antenas.

### 2.1.7. Ecuación de Friis

La ecuación de Friis es una fórmula de transmisión para un circuito de radiofrecuencia compuesto por dos antenas, una antena transmisora o 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,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal y  $d$  es la distancia de propagacion.

## 2.2. Antenas parabólicas

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

### 2.2.1. Tipos de antenas parabólicas

Las antenas parabolicas 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 radiacion hacia la antena alimentadora. El reflector secundario es un hiperboloide de rebolucion que se ubica en el foco de la parabola 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 radiacion hacia la antena alimentadora. El reflector secundario es un elipsoide de rebolucion que se ubica en el foco de la parabola 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 que la antena alimentadora se encuentra fuera de los ejes de la parabola principal. extendiendo el reflector principal. Este tipo de antenas se utilizan en aplicaciones donde se requiere una mayor area de cobertura evisando la obstruccion 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 que la antena alimentadora se encuentra en el foco de la parabola principal. Este tipo de antenas son más simples de construir, pero tienen otros desafios opticos 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-periodicas, 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 por 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.

### **2.3.2. Transformada Rápida de Fourier**

## **2.4. Radiotelescopios**

### **2.4.1. ¿Qué es un radiotelescopio?**

### **2.4.2. Línea de Hidrógeno Neutro**

### **2.4.3. CHARTS y FRB**

## **2.5. Telescopio CPT**

- 2.6. Metodos de caracterización**
  - 2.6.1. Medicion de patrón de radiación**
  - 2.6.2. Medición de sensibilidad**
  - 2.6.3. Medicion de la temperatura de ruido**
- 2.7. Estado del arte**

# Capítulo 3

## Ensambaje e instrumentacion

En este capitulo se presentaran todos los detalles del ensamblado del reflector parabolico, la instalacion del rotor y la integracion de estos con el soporte de la montura en el pedestal construido para el telescopio. Tambien se detallaran todos los instrumentos evaluados y seleccionados para la construccion del receptor de radiofrecuencia, el rack de control y la infraestructura de caracterizacion.

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

Para finalizar con la descripcion del software creado para la operacion, mantenimiento y caracterizacion del telescopio.

### 3.1. Ensamblado Mecánico

Tanto el reflector parabolico como la montura alt azimuthal y su correspondiente controlador, son elementos adquiridos de la compaňia *RFHAmdesign*, una empresa holandesa que se especializa en la construccion de telescopios de radio aficionados. El reflector de 3 metros venia completamente desarmado y con piezas que requerian ser modificadas y ensambladas para su correcto funcionamiento.

Para todo el ensamblado se utilizaron herramientas de y electricas, como taladors, tijeras de ojalata, 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 ademas de las piezas que requerian de modificacion adicional para la instalacion 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 parabolica, con un centro de aluminion donde estas 12 piezas se unen y apernan.



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

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

Luego desenrollan y enderezan los tubos de aluminio que confirmar los anillos donde se tensaran las mallas metalicas que conforman la superficie del reflector. Con la misma logica se toma 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 debian 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 timepos de fabricación y prototipado al usar componentes de aluminio o acero se decidio utilizar impresion 3D con filamento plastico PLA<sup>1</sup> de alta resistencia mecanica.

Se diseñaron 6 piezas en total con el software de diseño asistido por computadora o *CAD Fusion 360* de la compañía *Autodesk*. Todos los comonentes fueron impresos en PLA de alta resistencia o *Hyper-PLA* de la compañía *Creality*, otorgando una mayor resitencia a la flexion de 50% que el PLA convencional y una elongacion de 6.304 % en comparacion con la del PLA convencional de 3%. La configuracion de la impresion 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 impresion 3D en filamentops plasticos, es su baja incidencia en la deformacion o interferencia del comportamiento de radiofrecuencia, al ser un material no conductor introducido en el campo cercano de los componentes.

---

<sup>1</sup> Explicacion PLA

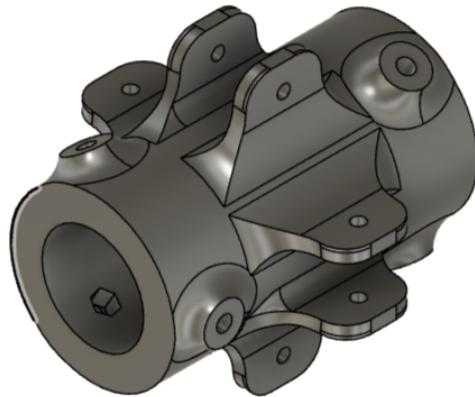


Figura 3.4: Union de los doportes de aluminio para el alimentador

El diseño 3D de la figura 3.4 es un soporte que contiene una cabidad centrar cilindrica que comple la función de sostener tanto el alimentador como el receptor por medio de un tubo plastico de PVC<sup>2</sup> que asegura que todo se mantenga alineado con el centro de la parabola, además de permitir un movimiento en el eje de la cabidad cilindrica para ajustar el foco del alimentador.

Tiene también 4 ranuras perforadas para asegurar los soportes con pernos M4 de medida y también 6 perforaciones con cabidades para tuercas M5. Con estas tuercas y con los respectivos tornillos se asegura la poscisión 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 distriubidor de PVC y en la elección de otro material de impresión 3D si se quisiese.

---

<sup>2</sup> PVC

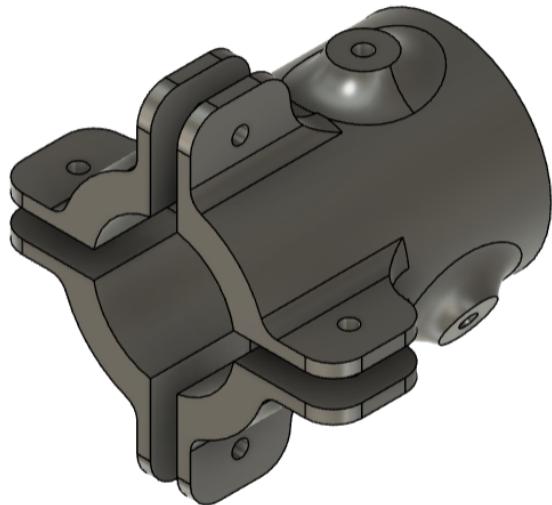


Figura 3.5: Interfaz de soporte para el tubo de distribucion y otros elementos

La figura 3.5 es un soporte multiproposito 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.

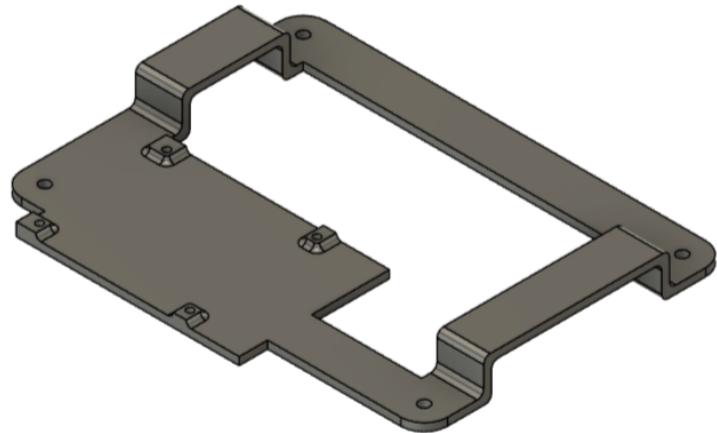


Figura 3.6: Soporte interno para electronica de recepción

El receptor de radiofrecuencia se encuentra dentro de una caja electrica a prueba de agua, pero se requiere un soporte interno para asegurar que la placa de adquisicion 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 electrica y permite montar diferentes tipos de receptores y amplificadores.

- 3.1.3. Montura Alt-Azimutal**
    - 3.1.4. Rack de control**
  - 3.2. Alimentador**
  - 3.3. Diseño del receptor**
    - 3.3.1. Cadena de recepción**
    - 3.3.2. Digitalizador y adquisición**
  - 3.4. Software de control y adquisición**
    - 3.4.1. Control de la montura**
    - 3.4.2. Adquisición de datos**
  - 3.5. Infraestructura de caracterización**
    - 3.5.1. Fuente de calibración**
    - 3.5.2. Fuente de ruido**
    - 3.5.3. Software de caracterización**

# **Capítulo 4**

## **Caracterización y puesta en servicio**

En este capitulo se expondran los procesos de caracterizacion y puesta en servicio del telescopio CPT. Para abordar los puntos de caracterizacion y primera luz de los objetivos propuestos para este trabajo. Se detallaran 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 medicion se utilizo un generador de senales generico con una LPDA de bajo ancho de banda. Luego para el resto de las mediciones se utilizo la estrella artificial de la copa de agua de la seccion XX.

#### **4.1.1. Alimentador sin soportes a 70 metros**

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



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

Con la antena de la figura 4.2.b se procedio a realizar el enfoque del alimentador. La medicion consiste en mover el alimentador en el eje Z, es decir en la direccion de la apertura del reflector. A una distancia de 70 metros desde el reflector se instaló sobre otro tripode un generador de señales portatil 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 configuro a una frecuencia de 1000MHz y se disparo constantemente el tono en dicha frecuencia. Se instalo a una distancia de 70 metros dentro del parque cerro Calan con la consideracion que por la apertura de 3 metros del reflector se obtiene un campo lejano de 60.5 metros a 1000MHz, por lo que este generador se encontraba en el campo lejano 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 alineo visualmente la antena del generador con el reflector a la distancia, la que se encuentra parcialmente con una linea de vista obstaculizada por arboles y arbustos.

Para efectos de la medicion, como se quiere encontrar un punto aproximado de enfoque la exactitud de esta medicion no es critica. Se procedio a mover el alimentador en el eje Z, es decir en la direccion de la apertura del reflector, hasta encontrar el punto donde la señal del generador era maxima.

La potencia recibida por el receptor fue medida con el software de medicon utilizando la RTL-SDR guardando los espectros para distancias de 5 cm en 5 cm. Se midio la razon señal a ruido y se obtuvo el punto de maxima potencia recibida en dBFS. Medidas que luego son calibradas en dBm por la medicion de sensibilidad.

#### 4.1.2. Alimentador con soportes con la estrella artificial

Para la medicion de enfoque con la estrella artificial se instalo el soporte tetrapodo y se coloco el alimentador en su posicion final despues de las mediciones anteriores. Se configuro generador de señales valon de la estrella artificial a 1428MHz. Se utiliza esta nueva frecuencia para evitar interferencia de radio frecuencia en la medicion, utilziando el filtro delgado de H1.

Para el caso de 1428MHz, la distancia de campo lejano es de 85 metros y la estrella artificial se encuentra a 186 metros, estando perfectamente en el campo lejano del reflector.

Ademas la alineacion con el reflector se realizo con el control automatico de la montura alt azimutal y la linea de vista se encuentra completamente libre para la priemra zona de fresnel.



Figura 4.4: Alimentador dipolo exotico con tetrapodo isntalado.

En la figura 4.4 se muestra el alimentador con el tetrapodo 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 medicion de enfoque, se movio el alimentador en el eje Z con una resolucion de 0.5 cm hasta encontrar el punto de maxima potencia recibida. Se midio la razon señal a ruido y se obtuvo el punto de maxima potencia recibida en dBFS al igual que en la medicion anterior.

## 4.2. Medicion del patrón de radiación

Se utilizaron 2 plataformas para la medicion del patron de radiacion, 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 patron de radiacion se realizaron en la cima del cerro Calan, en la plataforma de observacion del telescopio CPT. Para cada frecuencia medida, se hicieron los cortes azimutales y de elevecaion, o la medida del campo H y el campo E. Todos los cortes son de 180 grados para obtener con claridad los lobulos laterales y con una definicion de 1 punto por grado.

### 4.2.1. Medicion relativa para banda de H1

La medicion con la RTL-SDR se realizo a 1428MHz, utilizando el filtro angosto de la misma frecuencia de radioastronomy suplies. El generador Valon, se configuro a 1428MHz con una potencia injectada a la estrella artificial de 0.23dBm.

Las perdidas ohmnicas del cable coaxial RG316 a 1428MHz 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 obtiene una perdida de 21 dB. La potencia recibida por la antena es de -21 dBm aproximadamente

Con los software de medicion se obtuvieron los espectros de la señal recibida por la RTL-SDR, se midio la razon señal a ruido y se guardaron 1000 espectros para cada grado de elevacion y azimut. Como la copa de agua se encuentra en altura, se genera un plano semi-circular elevado en 7 grados sobre el eje horizontal, donde se corrigen los valores de elevacion por angulo azimutal con la ecuacion de correccion 2.7. Para el segundo corte, se genera un ofset de 7 grados en elevacion, y para medir de 0 a -90 grados, se invierte la posicion azimutal en 180 grados para obtener ese cuadrante.

#### **4.2.2. Medicion absoluta para todas las bandas de interes**

### **4.3. Sensibilidad y temperatura de ruido**

La medida de sensibilidad se realizó inyectando un tono para cada frecuencia de interes en la entrada de la cadena de recepcion. Se utilizó el generador de señales Rode and 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 300MHz, 400MHz y 500MHz para cubrir la banda de interes del proyecto CHARTS. Tambien se guardaron los espectros de 1000MHz, 1428MHz, 1500MHz y el límite de digitalizacion de 1700MHz.

#### **4.3.1. Medicion 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 amplificacion de 40dB. Para la cadena de amplificacion se utilizó el LNA + Filtro H1 SAWbird+ H1 de Nooelec, el cual se conectó a la fuente de ruido y se midio la potencia de ruido en la salida en el analizador de espectro.

Para la temperatura de ruido del receptor, se injectó la señal de ruido en la entrada del receptor y se midio la potencia de ruido con los espectros de la RTL-SDR en la banda de interes.

Para obtener la temperatura del sistema completo se realizó una acumulacion de espectros del centro de la galaxia a 1420MHz y a una region del cielo limpia en concentracion de hidrógeno neutro. Consultando a los catalogos de radioastronomia se obtuvo la temperatura de la galaxia y de la region del cielo.

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

## **4.4. Medicion del error de apuntamiento**

### **4.5. Primera luz**

Para la primera luz, se escojio el centro de la galaxia por varias razones. La primera es que es una fuente de radio muy fuerte, facil de detectar y es bastante estudiada y catalogada. La segunda razon es que para la epoca de medicion, noviembre, diciembre y enero, el centro de la galaxia se encuentra bastante cerca del cenit para la latitud de Santiago, lo que facilita la observacion.

El centro de la galaxia en 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 periodos de 2 horas por 3 dias, desde las 10 am hasta las 6 pm, para obtener la maxima cantidad de datos posibles. Tambien se descartaron algunas observaciones de donde el solo se encontraba muy cerca del centro de la galaxia, para evitar la saturacion del receptor.

Para la observacion se configuro el telescopio con el receptor de H1 y con la antena dipolo exotico en el foco geometrico del reflector. Se obtuvieron los espectros de la RTL-SDR y se guardaron en el disco duro para su posterior analisis.

# **Capítulo 5**

## **Analisis de Resultados**

- 5.1. Posicion del alimentador**
- 5.2. Patrón de radiación**
- 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

### 6.1. Trabajos Futuros

# 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://repository.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.
- [5] Finger, R. A., Design and construction of a digital sideband separating spectrometer for the 1.2-meter southern radio telescope. Tesis PhD, 2013.