



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

“SCI-HI: Integración de la antena Mango Peel en un radiómetro”

T E S I S

Presentada para obtener el título de:
Maestro en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización

Presenta:

Ing. Salomón Palillero Pérez *

Directores:

Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán (FCE-BUAP)

Dr. Richard Torrealba Meléndez (FCE-BUAP)

Dr. Omar López Cruz (INAOE)

Puebla, México

DICIEMBRE 2020

*Becario CONACYT.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica
Maestría en Ciencias de la Electrónica, Opción en
Automatización



Tesis

“ SCI-HI: Integración de la antena Mango Peel en un radiómetro ”

Alumno: **Salomón Palillero Pérez**

Directores de Tesis: **Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán (FCE-BUAP)**

Dr. Richard Torrealba Meléndez (FCE-BUAP)

Dr. Omar López Cruz (INAOE)

Puebla, diciembre de 2020

*A mis padres, Nazario y Emilia,
quienes me dieron la vida*

Agradecimientos

A muchas personas hay a quien agradecerles el que yo esté aquí. A Dios primeramente.

Quiero agradecer a mis asesores de tesis. A la Dra. Olga Félix Beltrán por sus sabios consejos, por estar siempre al pendiente y procurar lo mejor para nosotros. Al Dr. Richard Torrealba Meléndez por su asesoría, orientación y atención a mis dudas, por compartir su amistad y conocimientos conmigo. Al Dr. Omar López Cruz por su confianza al permitirme ser parte de SCI-HI, por su apoyo, amistad y mostrarme nuevos horizontes. Gracias a las y los profesores de la Maestría.

A CONACYT por el apoyo brindado durante estos dos años, apoyo sin el cual hubiera sido complicado continuar. A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por formarme durante la Licenciatura y ahora en Maestría, gracias a la Universidad en su conjunto. Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por los recursos materiales con los que se lleva a cabo el proyecto.

A mis padres por los valores y educación que me brindan en casa. Por nunca detenerme en mis metas. Por darme todo lo que estuvo en sus manos y aún más para que pueda llegar hasta donde hoy me encuentro. Sus esfuerzos no son en vano.

A mis amigos de curso con quienes compartí buenos momentos. Por su ayuda incondicional y por hacer más amena la estancia.

A todas las personas que con su esfuerzo y trabajo previo han contribuido en el desarrollo de este trabajo, ya que cualquier trabajo de investigación es siempre resultado de proyecto, ideas e investigaciones previas.

A todos muchas gracias.

Índice general

| | |
|--|-------------|
| Agradecimientos | IV |
| Resumen | VIII |
| Introducción | IX |
| 1. Antecedentes | IX |
| 2. Diagrama de bloques para resolver el problema | XI |
| 3. Objetivo general | XI |
| 4. Objetivos específicos | XI |
| 5. Estructura del documento | XII |
| 1. Marco cosmológico | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Efecto Doppler | 2 |
| 1.3. Hidrógeno y la línea de los 21 cm | 3 |
| 1.4. Experimentos alrededor del mundo | 5 |
| 1.5. Sonda Cosmológica de las Islas para la detección de Hidrógeno Neutro (SCI-HI) | 9 |
| 1.6. Conclusiones | 10 |
| 2. Antenas | 11 |
| 2.1. ¿Qué es y cuándo usar una antena? | 11 |
| 2.2. Parámetros fundamentales de una antena | 12 |
| 2.2.1. Patrón de radiación | 12 |
| 2.2.2. Intensidad de radiación | 13 |
| 2.2.3. Ancho de haz | 13 |
| 2.2.4. Directividad | 14 |
| 2.2.5. Eficiencia de una antena | 14 |
| 2.2.6. Ganancia | 15 |
| 2.2.7. Ancho de banda | 15 |
| 2.2.8. Polarización | 16 |
| 2.2.9. Impedancia de entrada | 16 |
| 2.2.10. Temperatura de antena | 16 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3. Tipos de antenas | 17 |
| 2.3.1. Antenas de alambre | 17 |
| 2.3.2. Antenas de apertura | 17 |
| 2.3.3. Antenas de microstrip | 17 |
| 2.3.4. Arreglo de antenas | 18 |
| 2.3.5. Antenas reflectoras | 19 |
| 2.4. Radiación de antenas | 19 |
| 2.5. Conclusiones | 21 |
| 3. Instrumentación de un radiómetro | 22 |
| 3.1. Amplificación | 24 |
| 3.2. Filtrado | 25 |
| 3.3. Calibración | 25 |
| 3.4. Conclusiones | 27 |
| 4. Antena Mango Peel | 28 |
| 4.1. Diseño | 29 |
| 4.2. Simulación | 33 |
| 4.2.1. Variación de altura | 34 |
| 4.2.2. Variación de separación entre elementos | 36 |
| 4.2.3. Variación de ángulo α | 37 |
| 4.2.4. Resultados | 38 |
| 4.3. Antena <i>Mango Peel</i> a escala | 42 |
| 4.4. Conclusiones | 46 |
| 5. Tarjeta ROACH2 | 48 |
| 5.1. Ambientación de computadora | 49 |
| 5.2. Ejemplos para uso de la tarjeta | 51 |
| 5.2.1. Introducción a Simulink | 51 |
| 5.2.2. Interface de 10GBe | 52 |
| 5.2.3. Espectrómetro de banda ancha | 52 |
| 5.2.4. Correlador de banda ancha | 53 |
| 5.3. Compilación y conexión ROACH2-Computadora | 54 |
| 5.4. Conclusiones | 55 |
| 6. Pruebas experimentales | 58 |
| 6.1. Conclusiones | 60 |
| Conclusiones y trabajo futuro | 63 |
| 6.2. Conclusiones | 63 |
| 6.3. Trabajo futuro | 64 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Bibliografía | 65 |
| Apéndice | 69 |
| 1. Constancia de congreso | 70 |
| 2. Artículo | 71 |
| 3. Constancia póster | 77 |
| 4. Constancia de idioma | 78 |

Resumen

En este trabajo de tesis se presentan los resultados de simulación de la antena *Mango Peel* para el experimento Sonda Cosmológica de las Islas para la detección de Hidrógeno Neutro, además se presenta la comparación entre datos medidos y simulados de una antena *Mango Peel* a escala. Se da una introducción al Marco Cosmológico dentro del cual se busca la señal del Hidrógeno Neutro de los primeros objetos luminosos en el Universo, señal que es buscada alrededor del mundo por diferentes experimentos. Los parámetros fundamentales de caracterización de una antena estándar, así como el concepto y elementos de un radiómetro se abordan. El proceso de ambientación de una computadora para el uso de la tarjeta *ROACH 2* y ejemplos de su uso son presentados. Se propone un sistema que comprende la etapa de detección, de acondicionamiento de señal mediante dispositivos de bajo ruido, de procesamiento usando un sistema basado en tecnología FPGA y la etapa de visualización de información mediante una interfaz creada en Python.

Introducción

1. Antecedentes

El momento cosmológico de las Edades Oscuras (la época anterior a la formación de los primeros objetos colapsados) y la época de la re-ionización o la época en que el medio intergaláctico está ionizado (EoR, por sus siglas en inglés) ha permanecido poco restringida observacionalmente [20, 2]. Inicialmente, la mayoría de los investigadores creía que el EoR fue un período muy breve en la historia cósmica; sin embargo, hay observaciones que indican lo contrario. La primera observación es proporcionada por las anisotropías de polarización del fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés) que han establecido el desplazamiento al rojo de la reionización a $z_{EoR} = 11 \pm 4$, donde z es una escala de longitud asociada al corrimiento al rojo, que lo sitúa en $z_{EoR} > 6 \pm 4$. Tomando estos resultados a su valor nominal, indican que el EoR fue más largo de lo originalmente previsto; por lo tanto, la ionización del medio intergaláctico (IGM, por sus siglas en inglés) en esas épocas se vuelve altamente compleja [6].

Un acercamiento más directo para restringir la Edad Oscura y el EoR es proporcionado por la detección de la línea hiperfina de 21cm (1420MHz) de hidrógeno neutro (HI). Para $z > 6$, la línea de 21cm en el corrimiento al rojo debería aparecer como un fondo débil y difuso para frecuencias inferiores a 200 MHz. La posibilidad de la detección de HI en esos altos corrimientos al rojo marca una nueva era en la exploración del Universo temprano [6]. La Cosmología y la Física de Partículas se enriquecerán con tal detección sin precedentes. Hoy en día, con un paradigma cosmológico general y los avances en la tecnología de detectores, podemos superar las complicaciones intrínsecas y técnicas inherentes a la línea de detección de 21 cm a alta z , su detección nos proporcionará una sonda única para restringir el EoR y las Edades Oscuras en primer lugar, pero en general, nos permitirá seguir la formación de la web cósmica y los primeros objetos luminosos, así como el mapeo de la evolución del IGM en su época más temprana [7, 8].

El prototipo de una antena usada para la detección de la radiación cósmica de fondo es crucial [33], así como la electrónica desarrollada para el procesamiento y análisis de dicha radiación. Por tal razón en esta propuesta de trabajo de investigación se plantea el diseño y construcción de una antena tipo *Mango Peel* (el nombre asociado por su configuración mecánica). Para ello se considerará estudiar y analizar los parámetros de caracterización de una antena estándar como:

el coeficiente de reflexión, impedancia de entrada, ancho de banda, diagrama de radiación, ancho de haz, ganancia, directividad, polarización, eficiencia y temperatura de la antena [22, 3, 21].

Las prestaciones de la antena diseñada se verifican primero mediante simulación empleando el software de onda completa como lo es FEKO [38]. En este tipo de programa se obtendrán el coeficiente de reflexión, la ganancia total y los diagramas de radiación en dos y tres dimensiones. Estos parámetros generados mediante simulación se utilizarán como referencia para comparar los parámetros obtenidos mediante mediciones en el laboratorio y en campo.

Además del experimento Sonda Cosmológico de las Islas para la Detección de Hidrógeno Neutro (SCI-HI) existen diversos proyectos que se dedican a la observación en 21 cm, como: LOFAR (Low Frequency Array) [9], PAPER (Precision Array for probing the Epoch of Reionization) [12], HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array) [14], MWA (Mileura Wide-Field Array) [11], DARE (Dark Ages Radio Explorer) [17], EDGES (Experiment to Detect the Global EoR Step) [15] y SARAS 2 (Shaped Antenna measurement of the background RADio Spectrum) [16]; en cada uno de estos proyectos se emplean antenas con las siguientes características: que operen en un ancho de banda con un rango de 40 – 120 MHz. También, se busca que las antenas presenten un diagrama de radiación con un ancho de haz principal de 60° en las frecuencias de 70 MHz, además de que cuenten con polarización dual.

Los proyectos LOFAR, PAPER, HERA y MWA emplean arreglos de dipolos cruzados del tipo corbata de moño (*bow tie*), para realizar la observación del fondo de cielo. Los arreglos de antenas que se forman se les conoce como *tiles dipoles* (azulejos de dipolos), la principal desventaja de estos es que son difíciles de calibrar y requieren de mayor infraestructura. Por otro lado, los proyectos DARE, SARAS, EDGES y SCI-HI utilizan un solo elemento antena para realizar la observación. Este elemento al igual que los anteriores proyectos es un dipolo cruzado. En el caso de DARE su observación se realiza en órbita, con esto se incrementan los costos en su implementación. El proyecto EDGES si bien utiliza un solo elemento de antena para realizar su observación, divide la banda de observación en tres rangos: bajo, medio y alto; utilizando en total tres antenas, una para cada rango. El proyecto SARAS 2 utiliza un monopolo esférico para realizar la observación, pero su ancho de banda de operación es de 130 300 MHz. En el caso del proyecto SCI-HI se utiliza una antena Hibiscus que tiene un rango de operación de 50 a 125MHz [33].

El presente trabajo pretende caracterizar e integrar la antena *Mango Peel* al proyecto SCI-HI, esta antena se plantea que mejore las propiedades de la antena *Hibiscus*. La antena *Mango Peel* contará con un ancho de banda mayor de la *Hibiscus*, la antena *Mango Peel* está basada en la antena de *Four Points* [34] como lo es la *Hibiscus*.

2. Diagrama de bloques para resolver el problema

El diagrama de bloques en el que se indica el proceso para resolver el problema se presenta en la figura 1.

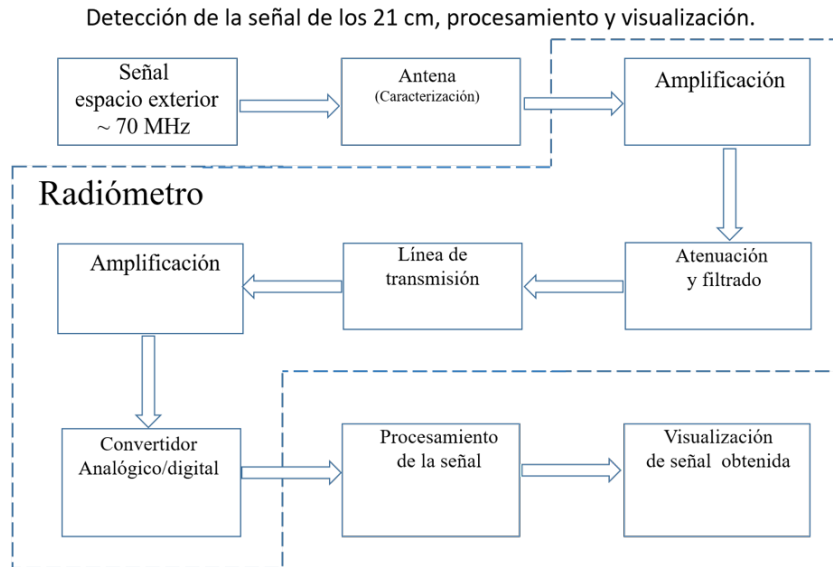


Figura 1: Diagrama a bloques del planteamiento del proyecto y la forma de resolver el problema.

3. Objetivo general

Modelar e integrar la antena principal del SCI-HI basada en un nuevo diseño Mango Peel. Medir el haz y sus principales características.

4. Objetivos específicos

1. Estudiar los conceptos básicos del marco Cosmológico.
2. Estudiar, conocer y usar los parámetros de caracterización de una antena estándar.
3. Estudiar y analizar el mecanismo de radiación electromagnética para calcular la forma de radiación de antenas.
4. Implementar técnicas de prueba para verificar el patrón y ganancia total de una antena.
5. Integrar la electrónica y aplicar las técnicas básicas de medición.
6. Implementar un radiómetro para realizar una observación en los 21cm con la antena Mango Peel, el procesamiento será usando la tarjeta ROACH 2.

7. Realizar pruebas experimentales.
8. Publicar resultados.
9. Escribir tesis.

5. Estructura del documento

Este trabajo de tesis está compuesto de seis capítulos los cuáles se describen a continuación:

- **Capítulo 1:** se presenta de forma general la teoría del Marco Cosmológico que se pretende explorar con el proyecto SCI-HI. Se presentan los antecedentes, se explica el efecto Doppler y su uso en astronomía además de la línea de los 21 cm del Hidrógeno Neutro, en la parte final se da una semblante de los experimentos que se desarrollan alrededor del mundo para buscar esta señal.
- **Capítulo 2:** aborda la teoría relacionada con las antenas, así como los parámetros de caracterización de una antena estándar, los tipos de antenas y se finaliza con las formas de radiación en estas.
- **Capítulo 3:** se da una introducción acerca de los radiómetros y su estructura en general. Se presentan los tipos de radiómetros y la instrumentación o acondicionamiento de señal para el presente proyecto de tesis, se muestran los dispositivos electrónicos para dicha función.
- **Capítulo 4:** describe el proceso de diseño, análisis y simulación de la antena *Mango Peel*. Se muestran los resultados obtenidos de simulación que incluyen el patrón de radiación y el coeficiente de reflexión. En la parte final se comparan los resultados simulados y medidos del patrón de radiación y coeficiente de reflexión de una antena *Mango Peel* construida a escala.
- **Capítulo 5:** se presenta de forma general el proceso para ambientar una computadora para trabajar con la tarjeta *ROACH 2* y ejemplos de desarrollo de proyectos desarrollados en Matlab/Simulink. Se presenta la forma de compilación de dichos proyectos y la conexión *ROACH 2*-Computadora.
- **Capítulo 6:** muestra el diagrama propuesto para implementar en el sistema de detección, acondicionamiento de señal y procesamiento para el proyecto SCI-HI. La interfaz creada en Python y primeras pruebas de la misma.

Capítulo 1

Marco cosmológico

1.1. Antecedentes

El estudio de los cuerpos celestes siempre ha intrigado a la humanidad. Desde la antigüedad las diferentes culturas a lo largo y ancho del globo terráqueo y en diferentes épocas han realizado observaciones de ellos, algunos creyendo que los astros gobiernan la vida de las personas, otros más pensando que en ellos encontrarían respuestas acerca del origen del universo, motivados por esta y otras interrogantes, se han desarrollado teorías acerca del origen del Universo, siendo la más aceptada la teoría del *Big Bang* o Gran Explosión. Aun con todas estas investigaciones, hay momentos cosmológicos que quedan ocultos, uno de esos momentos es lo que ocurrió antes de la reionización del medio interestelar, es por esto que se han propuesto experimentos para tratar de explicar estos procesos ocurridos a lo largo de millones de años.

Conforme el tiempo transcurre, el universo se expande, las galaxias se alejan unas de otras, esto trae consigo que la densidad de materia en el universo sea menor. Debido a que la luz de estrellas, galaxias y demás cuerpos celestes le toma un tiempo finito llegar a nosotros, la imagen que vemos de los diferentes cuerpos celestes o del universo mismo es cuando se emitió esa luz, este tiempo va desde algunos años hasta millones de años, se logra observar el espacio profundo a través de poderosos telescopios, algunos instalados en tierra y otros en órbita.

Existe un periodo entre los 400 mil años de la formación del universo y un billón de años, cuando se formaron las primeras galaxias, entre estas dos épocas hubo un periodo cuando el universo era oscuro y las estrellas aún no se habían formado, en la figura 1.1 se muestra una representación de las épocas desde el *Big Bang* y la frecuencia de hidrógeno neutro correspondiente a dicha época y que sería detectada actualmente en la Tierra.

Para observar diferentes longitudes de ondas o sus respectivas frecuencias se han construido grandes telescopios en la Tierra, también se han enviado al espacio telescopios ópticos como el telescopio espacial Hubble y próximamente su sucesor, el telescopio James Webb. En la Tierra se

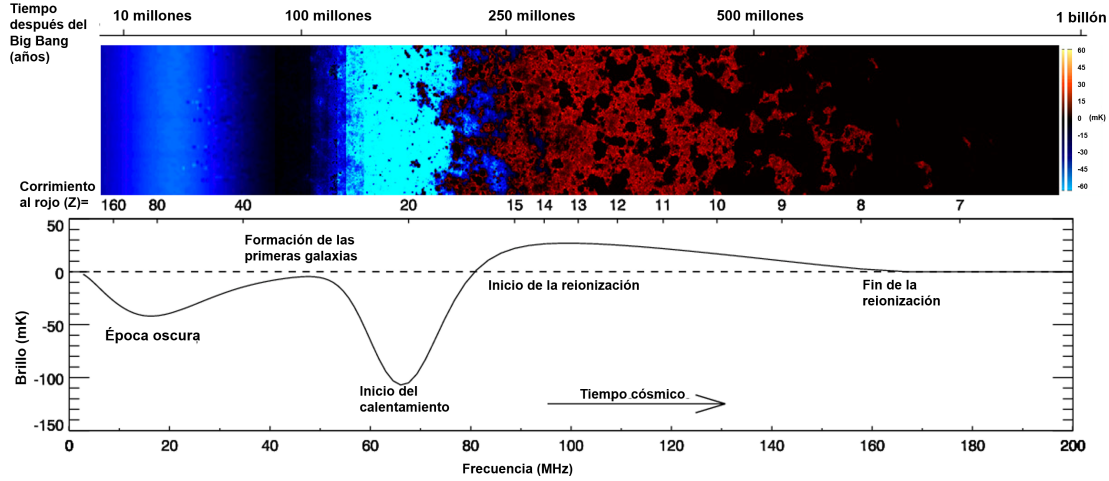


Figura 1.1: Épocas a partir del Big Bang y la frecuencia de detección [1].

están construyendo arreglos de radiotelescopios que serán capaces de mapear en tres dimensiones la distribución del hidrógeno cósmico que quedó del Big Bang en el universo temprano, algunos de estos arreglos se diseñan para detectar la longitud de onda de la radio emisión de los átomos de hidrógeno (21 cm corrida al rojo), sin embargo, esta longitud de onda se superpone con las emisiones de banda de radio fm y televisión. Para calcular la frecuencia que se quiere medir se emplea el efecto Doppler y el corrimiento al rojo.

1.2. Efecto Doppler

El efecto Doppler es un cambio en la frecuencia de ondas emitidas desde un objeto en movimiento relativo al observador. El efecto Doppler es usado en muchas áreas, uno de sus usos es en las mediciones del corrimiento al rojo para medir la velocidad de recesión de galaxias distantes [4].

El corrimiento al rojo z de un objeto es el cambio fraccional Doppler de su luz emitida resultante desde el movimiento radial [5]

$$z = \frac{v_e}{v_o} - 1 = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 \quad (1.1)$$

donde v_o y λ_o son la frecuencia y la longitud de onda observadas, v_e y λ_e son las correspondientes frecuencia y longitud de onda emitidas.

En la relatividad especial, el corrimiento al rojo está relacionado con la velocidad radial v de la siguiente forma:

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \quad (1.2)$$

donde c es la velocidad de la luz.

Para v/c pequeñas o distancias d pequeñas, en el universo en expansión, la velocidad de la luz es linealmente proporcional a la distancia, es decir:

$$z \approx \frac{v}{c} \quad (1.3)$$

En la figura 1.2 se observa la relación entre z y la arqueología cósmica, cuanto mayor es el corrimiento al rojo, el tiempo cósmico se acerca más a la época del *Big Bang*.

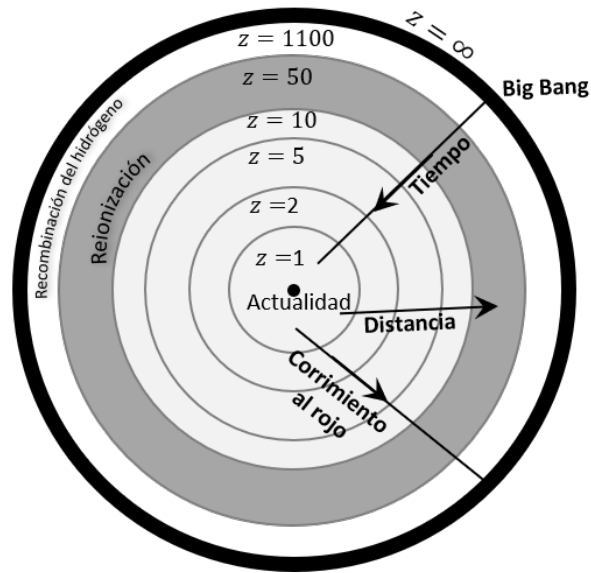


Figura 1.2: Arqueología cósmica y su relación con z [6].

1.3. Hidrógeno y la línea de los 21 cm

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo y a su vez es el átomo más simple, está compuesto por un protón y un electrón, se mantienen unidos por su atracción eléctrica mutua.

Del tiempo de vida de los niveles de energía con el número cuántico principal n mayor que uno, es más corto que el tiempo típico que le toma para excitarlos en los raros ambientes del universo, el hidrógeno es comúnmente encontrado en ese estado (en el nivel de menor energía) con $n = 1$. Eso implica que la transición en que debemos enfocarnos es la que involucra el estado $n = 1$.

En el nivel de energía $n = 1$ tienen lugar dos importantes transiciones en el átomo de hidrógeno, una de ellas es la transición de los 21 cm que se da entre dos estados hiperfinos

separados ligeramente. En el estado de mayor energía, el spin del electrón y el spin del protón giran en forma paralela, están alineados; en el estado de menor energía ambos spines están anti alineados, apuntan en sentidos opuestos. Durante la transición hacia el nivel de menor energía, se produce un giro en el spin del electrón lo que resulta en la emisión de un fotón el cual tiene una longitud de onda de 21 cm o dicho de otra manera, tiene una frecuencia de 1420 MHz, ver figura 1.3 .

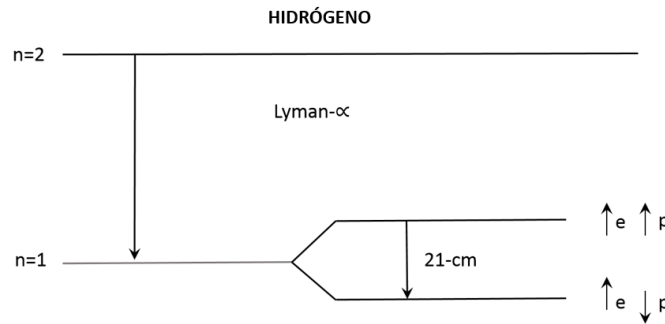
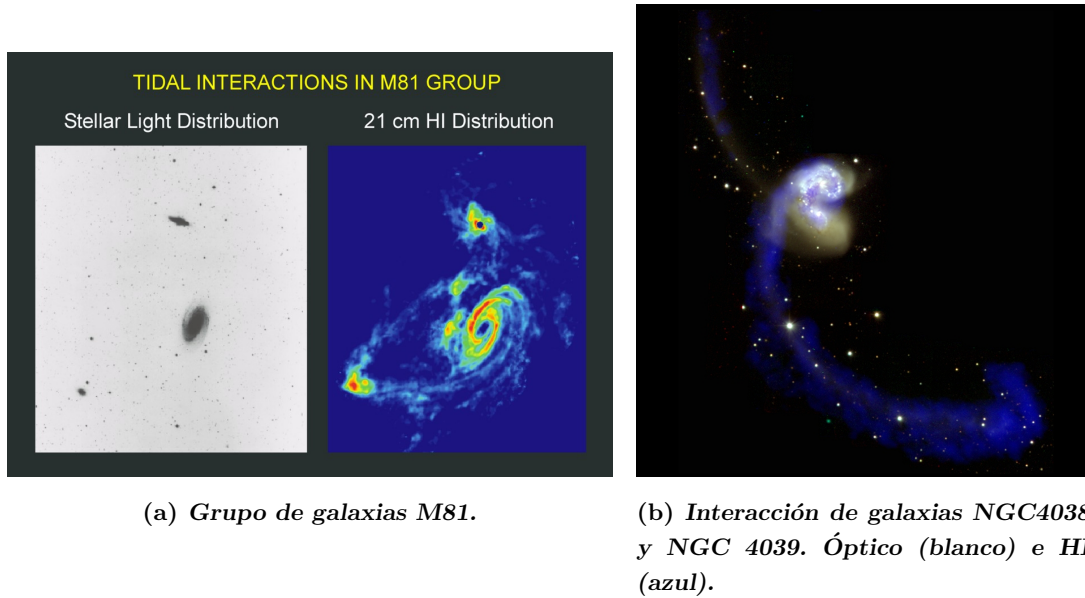


Figura 1.3: Nivel de energía $n = 1$ del hidrógeno y estados hiperfinos [6].

Cuando se observan diferentes longitudes de onda asociadas con la línea de 21 cm de la forma $(21 \text{ cm})(1 + z)$, entonces se corta al Universo a diferentes corrimientos al rojo. Realizar un mapeo completo de la distribución del hidrógeno neutro (HI) en el Universo como una función del corrimiento al rojo proporcionaría una imagen tridimensional del medio intergaláctico durante la reionización.

Los niveles hiperfinos del estado base del hidrógeno tiende a llegar a un equilibrio térmico con el CMB, haciendo que el IGM no sea observable. Cuando algún proceso cambia la población de los niveles hiperfinos y los aleja del equilibrio térmico, entonces el IGM llega a ser observable contra el CMB ya sea en emisión o absorción. En épocas tempranas, las colisiones dominaban el acoplamiento entre la temperatura de *spin* y cinética, ya que la densidad del gas era alta, sin embargo, una vez que la población significativa de galaxias se forma en el Universo, la temperatura de *spin* es afectada también por un mecanismo que actúa a través de la dispersión de fotones Lyman- α , el también llamado efecto de Field-Wouthuysen [6].

Varios equipos en el mundo se han dado a la tarea de diseñar y desarrollar arreglos de miles de antenas, generalmente del tipo dipolo, de baja frecuencia para estudiar la época de reionización por medio del mapeo de la distribución del hidrógeno atómico a través del Universo por medio de su línea espectral de los 21 cm. Una vez la señal sea detectada por las antenas, esta pasará por un proceso de correlación empleando software y equipo especial. Los nuevos experimentos son localizados o instalados mayormente en sitios remotos.



(a) Grupo de galaxias M81.

(b) Interacción de galaxias NGC4038 y NGC 4039. Óptico (blanco) e HI (azul).

Figura 1.4: Información adicional que proporciona el HI [56].

La detección de la señal de los 21 cm es compleja. Los electrones relativistas dentro de la Vía Láctea producen emisiones de radio sincrotrón a medida que giran alrededor del campo magnético galáctico. Esto resulta en un fondo de radio, el cual es más grande que la señal de reionización esperada por al menos un orden de magnitud de diez mil. Es posible aproximar las observaciones de la línea de 21 cm corridas al rojo, el primer indicio sería considerar la señal de emisión media, esto es el objetivo de los experimentos que emplean una sola antena, esta señal es ordenes de magnitud más tenue que el fondo de sincrotrón [6].

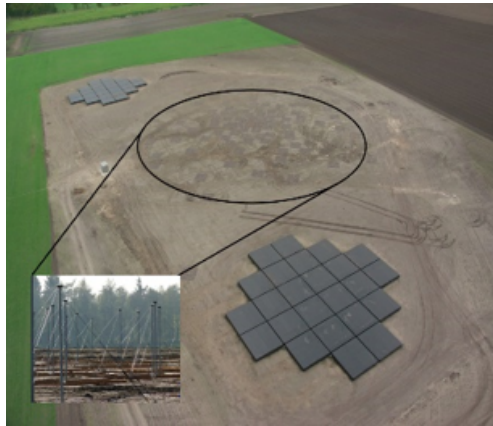
En la figura 1.4 se muestra la información adicional que es posible ver cuando se observan diferentes cuerpos celestes en el rango de detección de hidrógeno neutro. Se observan detalles que no son posibles ver en otro rango de frecuencias, de ahí la importancia del estudio de la emisión de los 21 cm de hidrógeno neutro tanto cuerpos luminosos más recientes como de la radiación de los primeros objetos colapsados en el Universo.

1.4. Experimentos alrededor del mundo

Dada la importancia de la señal del hidrógeno neutro proveniente de la formación de los primeros objetos luminosos en el universo, alrededor del mundo se desarrollan y llevan a cabo varios experimentos que buscan dicha señal en diferentes rangos de frecuencias y a diferente z . Algunos de estos experimentos usan arreglos interferométricos de antenas como es el caso de LOFAR (Low Frequency Array) el cual es un radio interferómetro construido en el norte de Holanda y su rango de frecuencia de trabajo va desde 10 a 240 MHz, consta de 40 estaciones

[9]; LEDA (Large Aperture Experiment to detect the Dark Ages) incluye cinco radiómetros de polarización dual y trabajan en frecuencias que van desde 30 a 85 MHz, operan como parte de un arreglo interferométrico [10]; MWA (Murchinson Widefield Array) es un arreglo de radio telescopios diseñado para operar en los rangos de frecuencia de 80-300 MHz, participa en tres proyectos, consta de 8192 dipolos de banda ancha y doble polarización [11]; PAPER, por sus siglas en inglés (*The Precision Array for Probing the Epoch of Reionization*) es un radio interferómetro de baja frecuencia, emplea un arreglo de 64 antenas en Sudáfrica y 32 cerca de Green Bank [12]; SKA (Square Kilometer Array) es un esfuerzo internacional para construir el radio telescopio más grande del mundo, cuando esté terminado constará de más de un millón de antena de baja frecuencia, participan más de 20 países [13], HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array) es un radiotelescopio dedicado a observar escalas durante y antes de la reionización, cuando se complete estará compuesto por 350 antenas parabólicas de 14 m de diámetro, se ubica en Sudáfrica y su rango de frecuencia de trabajo va de 50 a 250 MHz [14]. En la figura 1.5 se muestran estos experimentos.

También se desarrollan otros experimentos que usan solo un elemento de antena como EDGES (Experiment to Detect the Global Eor Signature) que está localizado en Australia y consta de dos antenas para trabajar en dos rangos de frecuencia [15]; SARAS2 (Shaped Antenna measurement of the background RAdio Spectrum) es un radiómetro que fue diseñado para detectar la señal de los 21 cm en la banda de los 40 a los 200 MHz, se encuentra en la India y es una antena esférica monopolo sobre un disco [16]; DARE (Dark Ages Radio Explorer) tiene planeado trabajar en un rango de frecuencias de 40-120 MHz, en un principio estaba planeado que orbitara alrededor de la Luna, consta de dos antenas tipo dipolo bicónicas [17]; BIGHORNS (Broadband Instrument for Global HydrOgen ReioNisation Signal) es un radiómetro de potencia total, consta de una antena bicónica (CE300E de Compliance Engineering Pty Ltd) que trabaja en un rango de 20 MHz a 300 MHz, se probó en el poniente de Australia [18]; PRI^ZM (Probing Radio Intensity at high-Z from Marion) emplea dos antena de tipo dipolo con polarización dual que trabajan a dos rangos de frecuencias diferentes, fue instalado en la Isla Marion [19]; SCI-HI (Sonda Cosmológica de las Isla para la detección de Hidrógeno Neutro) consta en una primera etapa de una antena dipolo de cuatro elementos, se instaló en la Isla Guadalupe en México [20]. Las antenas que se usan en los experimentos son de diferentes formas y en su mayoría son del tipo dipolo de media onda con diferentes configuraciones mecánicas. En la figura 1.6 se observan las diferentes antenas que son implementadas en estos experimentos.



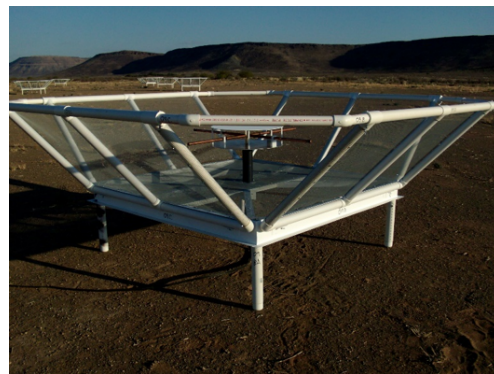
(a) **LOFAR** [9].



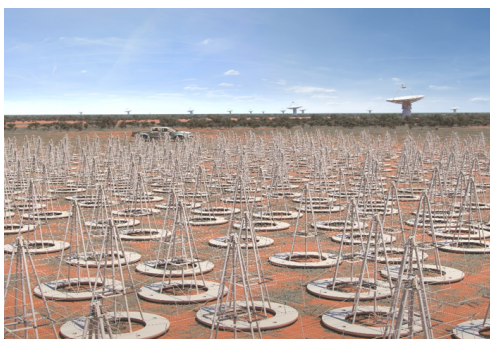
(b) **LEDA** [10].



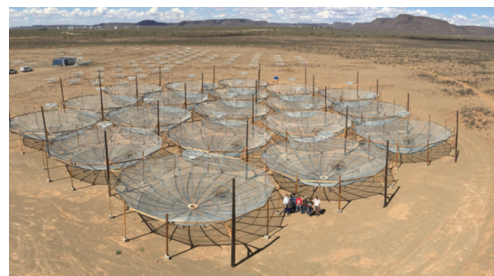
(c) **MWA** [11].



(d) **PAPER** [12].



(e) **SKA** [13].



(f) **HERA** [14].

Figura 1.5: Experimentos que usan arreglos interferométricos.

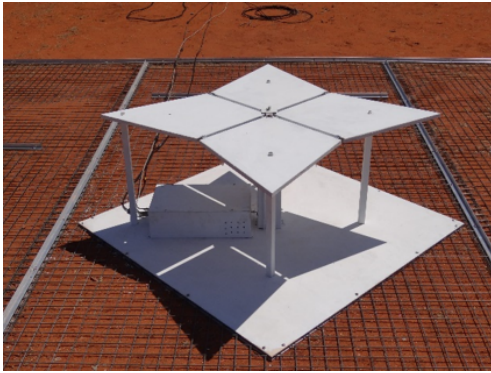
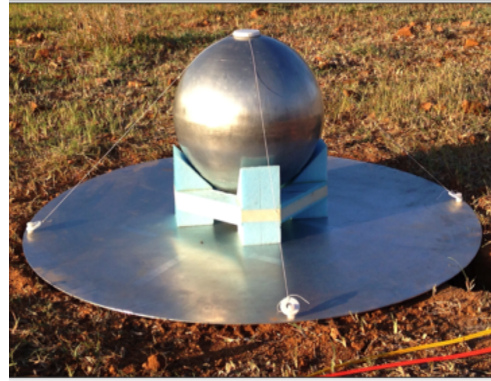
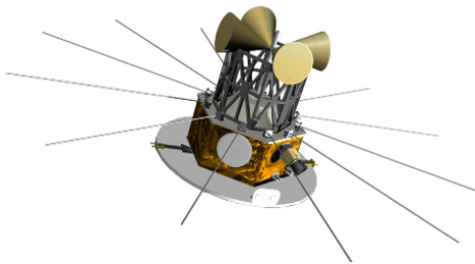
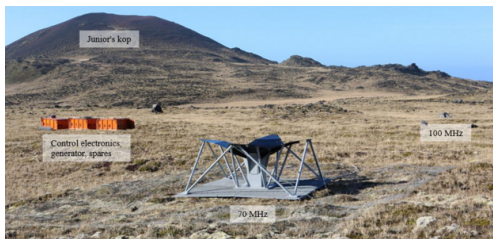
(a) *EDGES* [15].(b) *SARAS2* [16].(c) *DARE* [17].(d) *BIGHORNS* [18].(e) *PRIZM* [19].(f) *SCI-HI* [20].

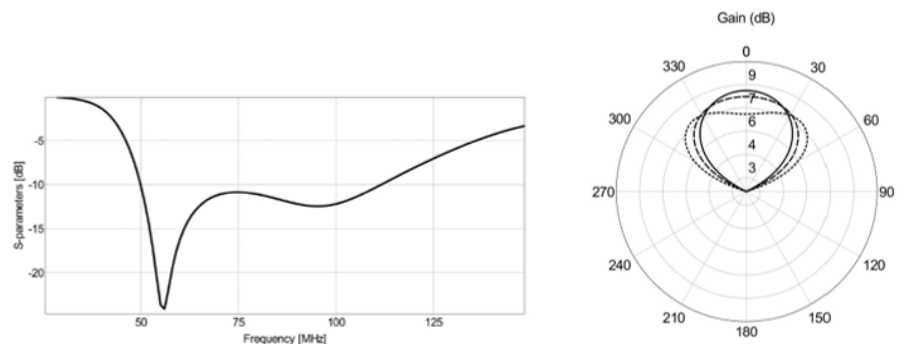
Figura 1.6: Experimentos que usan solo un elemento de antena.

1.5. Sonda Cosmológica de las Islas para la detección de Hidrógeno Neutro (SCI-HI)

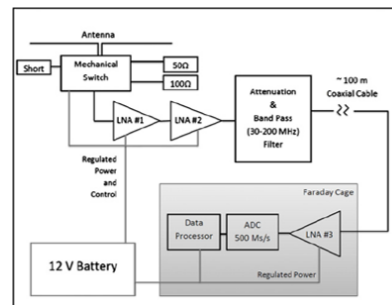
El experimento Sonda Cosmológica de las Islas para la detección de Hidrógeno Neutro es un proyecto que se desarrolla en territorio mexicano, es desarrollado por científicos mexicanos y con colaboración internacional. Dentro de sus objetivos se encuentra la detección de la línea de los 21 cm de Hidrógeno Neutro de los primeros objetos colapsados con un corrimiento al rojo de $z \sim 20$.

Una primera etapa se implementó en la zona radio protegida de Green Bank, en Estados Unidos, y en la Isla Guadalupe, que fue declarada reserva de la biosfera y es una de las mejores zonas radio silentes en el país, se localiza a 260 km de la costa de la Península de Baja California en México.

Esta primera etapa incluía únicamente una antena de cuatro elementos llamada *Hibiscus*. Esta antena está escalada para trabajar a 70 MHz, el diseño de esta antena y su coeficiente de reflexión se muestran en la figura 1.7. La señal que captaba la antena pasaba a través de algunos dispositivos electrónicos para acondicionarla y posteriormente procesarla mediante una computadora personal con sistema operativo Ubuntu Server y diferentes lenguajes de programación para las diferentes tareas [55].



(c) Diseño Hibiscus [20].



(d) Diagrama a bloques [20].

Figura 1.7: Antena Hibiscus usada en el experimento SCI-HI.

De la figura 1.7 se tiene que el ancho de banda con respecto al coeficiente de reflexión es de 50 MHz a 110 MHz y su patrón de radiación deja de ser direccional conforme la frecuencia aumenta.

1.6. Conclusiones

La detección y estudio de la señal del Hidrógeno Neutro de los primeros objetos luminosos a alta z abre un nuevo paradigma en el campo de la Astrofísica. El estudio del Marco Cosmológico proporciona un panorama general de la señal que se busca detectar. Así mismo, al ser el elemento más simple y el primero en formarse, el hidrógeno neutro proporciona información de épocas del Universo que hasta ahora son desconocidas. El conocer los experimentos que se desarrollan para detectar la línea de los 21 cm de hidrógeno neutro permite tener un panorama general de los avances que se tienen en esta línea de investigación.

Capítulo 2

Antenas

El uso de antenas para sistemas de comunicaciones y como detectores o receptores de señales se ha incrementado con el paso del tiempo. Las antenas presentan ventajas sobre otras formas de transmitir señales a través de grandes distancias. El estudio de la teoría de las mismas, así como de sus principales parámetros proporciona nuevos conocimientos para abordar y dar solución a diferentes problemas.

2.1. ¿Qué es y cuándo usar una antena?

Llevar una señal eléctrica entre dos puntos se realiza mediante dos formas: 1) usando una línea de transmisión y 2) a través del espacio libre usando antenas en cada una de las terminales [22]. Las líneas de transmisión confinan la señal y su correspondiente onda electromagnética a una región cercana o dentro de la misma línea, un ejemplo de esto se ve en los circuitos impresos; por su parte, una antena permite a una señal alcanzar grandes distancias desde la misma mediante la radiación de dicha señal.

La IEEE define a una antena como: *la parte de un sistema receptor o emisor que está diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas*. Es posible considerar a una antena como un transductor ya que convierte una onda guiada en una línea de transmisión a una onda electromagnética radiada en el espacio libre y viceversa. Para que una antena sea eficiente, esta debe tener una extensión física que sea al menos una fracción apreciable de una longitud de onda en una determinada frecuencia de operación, para conocer la frecuencia o la longitud de onda de una señal se emplea la relación dada por 2.1

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.1}$$

donde λ es la longitud de onda (metros, centímetros, milímetros, etc.), c es la velocidad de la luz en el vacío (299.792.458 km/s) y f es la frecuencia de la señal (hertz y múltiplos).

Dependiendo de la aplicación es que se escogen las líneas de transmisión o las antenas para enviar y recibir señales. Uno de los motivos más importantes para usar una antena en lugar de una línea de transmisión es que conforme la distancia y la frecuencia aumentan, los costos y las pérdidas de señal también aumentan cuando se emplean líneas de transmisión.

2.2. Parámetros fundamentales de una antena

Para describir el desempeño y funcionamiento de una antena se requiere conocer los parámetros de caracterización, algunos de estos son: patrón de radiación, intensidad de radiación, ancho de haz, directividad, eficiencia, ganancia, polarización, impedancia de entrada; a continuación se describen.

2.2.1. Patrón de radiación

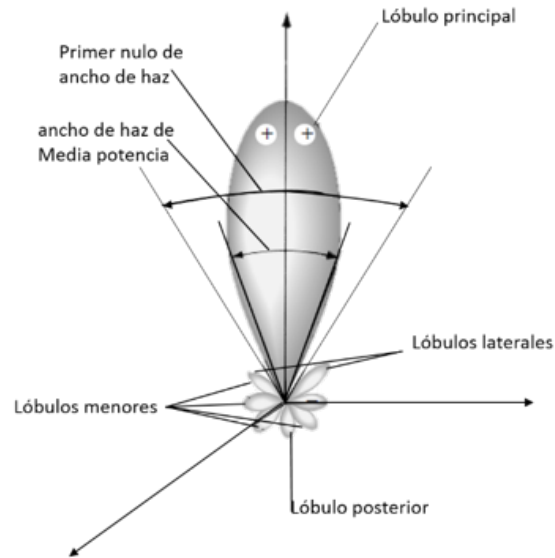
El patrón de radiación de una antena se define como una función matemática o representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena como una función de coordenadas espaciales. Generalmente este patrón de radiación se determina en la región del campo lejano de la antena. Con frecuencia los patrones de campo son normalizados con respecto a su máximo valor. En el patrón de radiación se presentan lóbulos, los cuales son lóbulos menores, posterior y el de mayor importancia es el lóbulo principal, ver figura 2.1, se denomina principal ya que es el que determina el tipo de patrón de la antena.

El patrón de radiación de una antena se clasifica como isotrópico, direccional u omnidireccional. Un elemento radiador isotrópico es definido como *una antena ideal hipotética sin pérdida que tiene igual radiación en todas las direcciones*, por otra parte, una antena direccional es la que tiene la propiedad de radiar o recibir ondas electromagnéticas más eficientemente en una dirección que en otras, por último se tiene a los patrones omnidireccionales los cuales son definidos como aquellos que tienen un patrón esencialmente no direccional en un plano dado, en la figura 2.2 se observa los diferentes patrones de radiación.

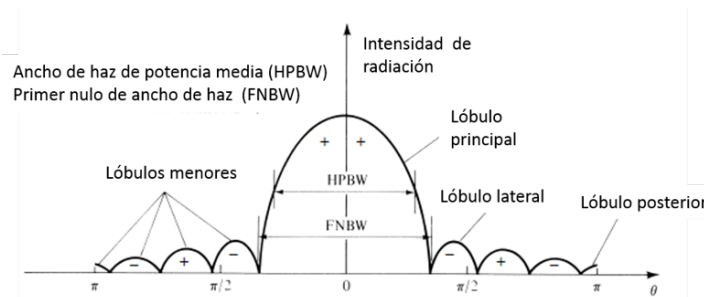
Como se menciona anteriormente, el patrón de radiación generalmente se toma en el campo lejano el cual se define como la región del campo de una antena donde la distribución angular del campo es esencialmente independiente de la distancia desde la antena, el límite interior de esta región está dado como:

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

y el límite exterior en el infinito, de la ecuación 2.2 D es la dimensión mayor de la antena y λ es la longitud de onda de la señal.



(a) Patrón de radiación en 3D.



(b) Patrón de radiación en 2D.

Figura 2.1: Lóbulos del patrón de radiación de una antena [21].

2.2.2. Intensidad de radiación

La intensidad de radiación en una dirección dada es definida como la potencia radiada desde una antena por unidad de ángulo sólido [21], es un parámetro del campo lejano y se puede obtener al multiplicar la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia, es decir

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.3)$$

donde U es la intensidad de radiación (W /unidad de ángulo sólido) y W_{rad} es la densidad de radiación (W/m^2).

2.2.3. Ancho de haz

El ancho de haz de un patrón se define como la separación angular entre dos puntos idénticos en lados opuestos del patrón. Uno de los de haz más usados es el HPBW (Half-Power Beamwidth), el cual es definido por la IEEE como: en un plano conteniendo la dirección del máximo de un

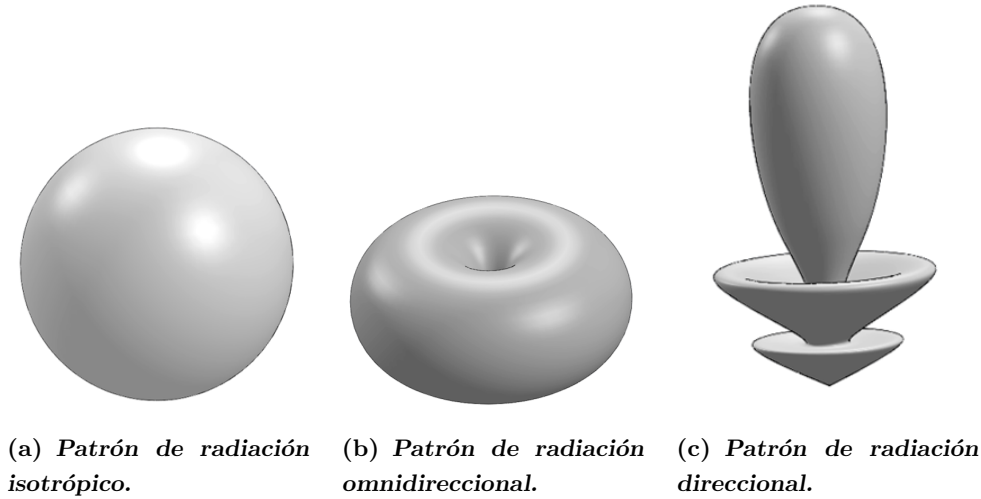


Figura 2.2: Diferentes patrones de radiación.

haz, el ángulo entre las dos direcciones en las cuales la intensidad de radiación es la mitad del valor del haz, está también el FNBW (First-Null Beamwidth) que es la separación angular entre los primeros nulos del patrón, el más empleado es el HPBW [21], estos anchos de haz se muestran en la figura 2.1.

2.2.4. Directividad

Para una antena, la directividad está definida como la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada desde una antena y la intensidad de radiación promediada sobre otras direcciones, en otras palabras, la directividad de una antena no isotrópica es igual a la relación de su intensidad de radiación en una dirección dada sobre una fuente isotrópica, es decir:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

donde U_0 es la intensidad de radiación de una fuente isotrópica y P_{rad} es la potencia total radiada [21]. Para la mayoría de las antenas en la práctica, sus patrones de radiación son muy complejos por lo que se emplea software para calcularlos y visualizarlos.

2.2.5. Eficiencia de una antena

La eficiencia de una antena e_0 es usada para tomar en cuenta las pérdidas en las terminales de entrada por falta de acoplamiento de impedancia y dentro de la estructura de la antena por conducción y dieléctrico. En general, la eficiencia total se puede escribir como:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.5)$$

donde e_0 es la eficiencia total (adimensional), e_r es la eficiencia por reflexión o desajuste ($1 - |\Gamma|^2$) (adimensional), e_c es la eficiencia por conducción (adimensional), e_d es la eficiencia por

el dieléctrico (adimensional) y Γ es el voltaje del coeficiente de reflexión en las terminales de entrada de la antena.

Se define el llamado VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) de la siguiente forma:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.6)$$

donde Γ se define como:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.7)$$

de la ecuación 2.7, Z_{in} es la impedancia de entrada de la antena, Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión.

La ecuación 2.5 se reescribe como:

$$e_0 = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (2.8)$$

de la ecuación 2.8 se tiene que $e_{cd} = e_c e_d$ es la eficiencia de radiación de la antena y se usa para relacionar la ganancia y la directividad [21].

2.2.6. Ganancia

La ganancia de una antena es una medida que toma en cuenta la eficiencia de la antena así como sus capacidades direccionales y está relacionada de forma cercana con la directividad. La ganancia en una dirección dada es definida como la relación de la intensidad, en una dirección dada, con la intensidad de radiación que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de forma isotrópicamente, en forma de ecuación se tiene:

$$Ganancia = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

Generalmente se considera la ganancia relativa, esta es definida como la relación de la ganancia de potencia en una dirección dada y la ganancia de potencia de una antena de referencia en esa dirección. La potencia radiada total (P_{rad}) está relacionada con la potencia total de entrada (P_{in}) por:

$$p_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (2.10)$$

donde e_{cd} es la eficiencia de radiación de la antena (adimensional).

2.2.7. Ancho de banda

El rango de frecuencias dentro de las cuales el desempeño de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar especificado es llamado ancho de banda de una antena [21]. Se considera también como el rango de frecuencias a ambos lados de la frecuencia central, usualmente la frecuencia de resonancia para un dipolo, donde las características de la antena están dentro de un valor aceptable. Otro concepto de ancho de banda es que se entiende como una relación entre la frecuencia superior y la frecuencia inferior de operación o como un porcentaje de la frecuencia central.

2.2.8. Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada es definida como la polarización de la onda radiada por una antena. La polarización es la curva trazada por el punto final de la flecha, el vector, representando el campo eléctrico instantáneo.

La polarización de una antena se clasifica como lineal, circular o elíptica, siendo la lineal y circular casos especiales de la elíptica. La polarización lineal se produce si el vector del campo eléctrico o magnético en un punto dado está siempre orientado a lo largo de la misma línea recta en cada instante de tiempo [21]. La polarización circular en un punto dado ocurre si el vector de campo eléctrico o magnético dibuja un círculo como una función del tiempo, el vector de campo debe tener dos componente lineales ortogonales además de tener la misma magnitud y debe haber un desfase entre ambos de múltiplos impares de 90° . Para la polarización elíptica, la punta del vector de campo eléctrico o magnético debe trazar una elipse en el espacio, el vector de campo debe tener dos componentes ortogonales, estos componentes pueden ser de la misma o diferente magnitud, en caso de que no tengan la misma magnitud la diferencia entre fases no debe ser 0° o múltiplos de 180° .

2.2.9. Impedancia de entrada

La impedancia de entrada es definida como la impedancia presentada por una antena en sus terminales o la razón del voltaje sobre la corriente en un par de terminales [21]. La razón del voltaje y la corriente en las terminales de entrada, sin carga adjunta, define la impedancia de una antena como:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.11)$$

donde Z_A es la impedancia de entrada entre las dos terminales (ohms), R_A es la resistencia en las terminales de entrada (ohms) y X_A es la reactancia de ambas terminales (ohms).

2.2.10. Temperatura de antena

Todos los objetos que tienen una temperatura superior al cero absoluto radian energía. La cantidad de energía radiada se representa generalmente por una temperatura equivalente T_B , mejor conocida como temperatura de brillo, esta se define como:

$$\begin{aligned} T_B &= \epsilon(\theta, \phi)T_m \\ &= (1 - |\Gamma|^2)T_m \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde T_B es la temperatura de brillo (Kelvin), ϵ es la emisividad (adimensional) y tiene un valor entre $0 \leq \epsilon \leq 1$, T_m es la temperatura molecular (Kelvin) y $\Gamma(\theta, \phi)$ es el coeficiente de reflexión de la superficie para la polarización de la onda.

La antena capta la temperatura de brillo de diferentes fuentes, estas aparecen en sus terminales como una temperatura de antena.

2.3. Tipos de antenas

Dependiendo de la aplicación que se requiera es como se elige un determinado tipo de antena, por lo que se debe conocer los tipos de antenas así como sus características. A continuación se describen algunos tipos.

2.3.1. Antenas de alambre

Este tipo de antenas son las más empleadas debido a que su construcción es relativamente fácil. Son empleadas en muchos lugares como automóviles, edificios, barcos, aviones, etcétera. Se encuentran diversas formas como los dipolos rectos, circulares, helicoidales, entre otras formas, algunas de estas se observan en la figura 2.3.

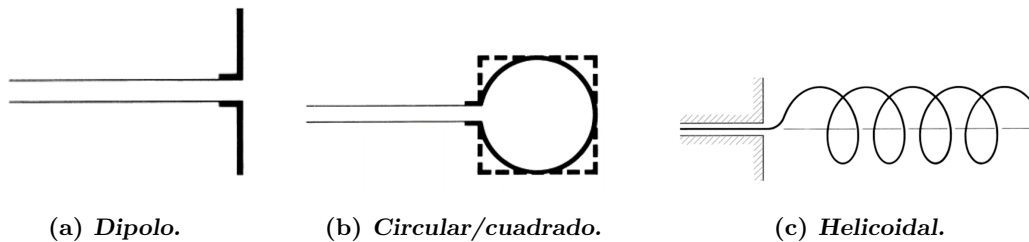


Figura 2.3: Diferentes formas de antenas de alambre [21].

2.3.2. Antenas de apertura

Estas antenas son ampliamente usadas debido a que cada vez más son necesarias antenas con formas sofisticadas para aplicaciones específicas en altas frecuencias, en la figura 2.4 se muestran algunas formas, uno de sus principales usos es en aeronaves [21].



Figura 2.4: Diferentes configuraciones de antenas de apertura [21].

2.3.3. Antenas de microstrip

Estas antenas consisten en un parche metálico con alguna forma específica sobre un sustrato que funciona como dieléctrico. El parche metálico puede tomar diferentes formas, algunas de las

más comunes son las circulares y rectangulares debido a su facilidad de análisis y fabricación, ya que es sencilla y relativamente económica, en la figura 2.5 se presentan dos tipos de estas antenas.

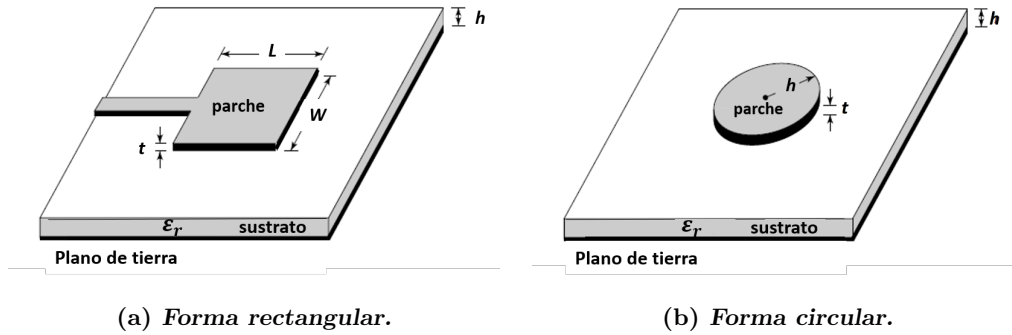


Figura 2.5: Diferentes configuraciones de antenas de microstrip [21].

2.3.4. Arreglo de antenas

Cuando se requieren características específicas de radiación y que no se pueden alcanzar por un solo elemento, se hace uso de un arreglo eléctrico y geométrico de antenas como las que se muestran en la figura 2.6, estos arreglos proporcionan las características de radiación deseadas.

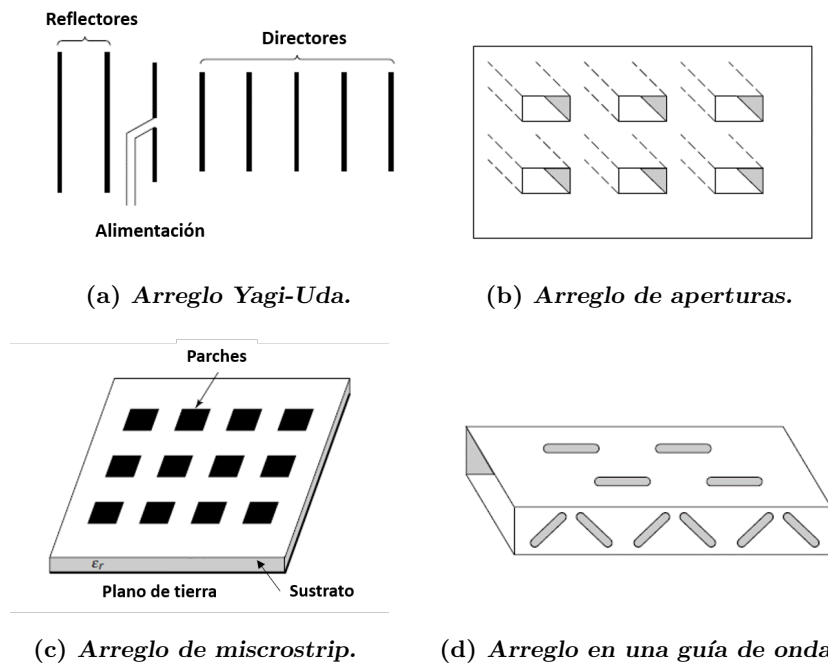


Figura 2.6: Diferentes configuraciones de antenas de apertura [21].

2.3.5. Antenas reflectoras

Estas antenas son empleadas principalmente por tener altas ganancias y por la necesidad de transmitir o recibir señales a través de muy grandes distancias. Hay reflectores tipo parabólicos, de esquina, entre otros; algunos se muestran en la figura 2.7.

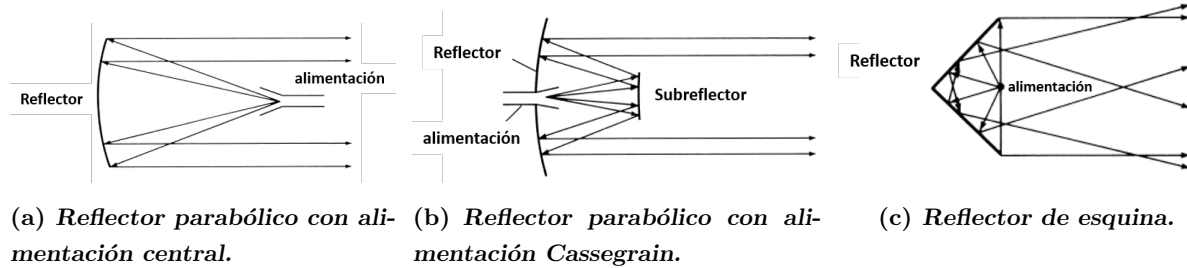


Figura 2.7: Configuraciones de antenas reflectoras [21].

2.4. Radiación de antenas

Para transmitir información, las antenas emiten radiación, esta radiación corresponde a la señal electromagnética que es transportada a través de líneas de transmisión. Como es sabido, la radiación es una perturbación de los campos electromagnéticos que se propagan desde una fuente, esta perturbación se crea a partir de variar la corriente en el tiempo en la fuente, por lo tanto hay una aceleración en la distribución de carga asociada con dicha corriente.

Para las antenas, el mecanismo de radiación se da al mover las cargas adelante y hacia atrás que sería la respuesta de un generador oscilante. La frecuencia de oscilación de la onda determina la frecuencia de la onda radiada [21].

Las fuentes básicas de radiación se dan en un cable bajo ciertas circunstancias y en dos cables o conductores eléctricos. La forma de producir radiación electromagnética en un cable es que haya una corriente variante en el tiempo o una aceleración de las cargas, para que suceda la aceleración de las cargas un cable debe ser curvado, doblado, discontinuo, terminado o truncado como se muestra en la figura 2.8, además si las cargas tienen movimiento oscilante en el tiempo, se produce radiación incluso si el cable es recto [21].

Cuando se conecta una fuente de voltaje a dos conductores y estos a su vez a las terminales de una antena, al aplicar voltaje a los conductores se crea un campo eléctrico entre ellos. La creación en el conductor de campos eléctricos y magnéticos variantes en el tiempo forman ondas electromagnéticas las cuales viajan a lo largo de la línea de transmisión, al desplazarse por los conductores y llegar a la antena, estas tienen asociadas cargas eléctricas y la corriente respectiva, al llegar a la antena y después de recorrer su estructura, se forman las ondas en el espacio libre;

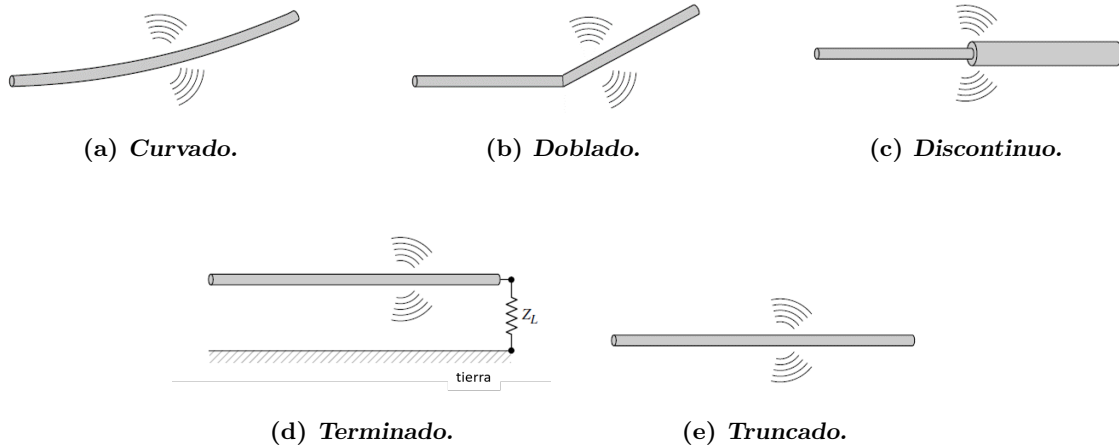


Figura 2.8: Formas de radiación de un solo cable [21].

estas ondas también son periódicas con una fase constante en el punto final de la antena, se mueven externamente con la velocidad de la luz, en la figura 2.9 se presenta un ejemplo de la radiación mediante dos cables.

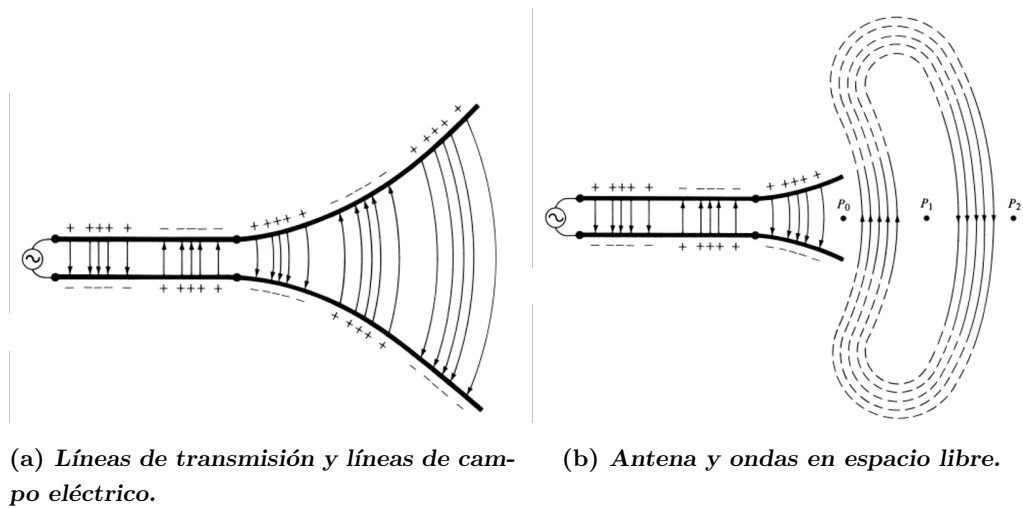


Figura 2.9: Fuente de voltaje, líneas de transmisión, antena y separación de líneas de campo eléctrico [21].

2.5. Conclusiones

Hay aplicaciones en las que el uso de líneas de transmisión no es factible por los costos y por la distancia. En los casos en los que la distancia entre dos puntos a comunicar es extensa la opción es usar antenas como receptoras y emisoras. Existe una amplia variedad de antenas con diferentes formas, diferentes configuraciones y materiales de construcción; en algunas aplicaciones en donde se necesita cierta respuesta y un elemento de antena no es capaz de proporcionar lo solicitado, entonces se hace uso de arreglos de antenas. Conocer los parámetros de caracterización de una antena es importante ya que mediante estos es como se determina el desempeño y respuesta de la antena antes de ser construida e instalada, así como elegir la más adecuada para alguna aplicación. Este capítulo servirá como base para comprender el funcionamiento de la antena *Mango Peel*, así como en la determinación de parámetros de caracterización de esta antena.

Capítulo 3

Instrumentación de un radiómetro

Toda la materia que tiene una temperatura por encima del cero absoluto emite radiación, esta radiación es producto de la interacción entre átomos y moléculas que componen la materia. La materia en general puede absorber o reflejar la radiación proveniente de otra fuente, esto depende de la composición y arreglo de los elementos de los cuales está formado, para comprender mejor esto, se hace uso de un objeto hipotético ideal llamado cuerpo negro, este cuerpo es capaz de absorber toda la radiación que incide sobre él sin reflejarla [23].

Dada la importancia de las señales que se reciben desde el espacio provenientes de cuerpos celestes y/o extragalácticos, después de viajar millones de kilómetros, la potencia con la que llegan a la Tierra es muy débil, debido a esta característica es necesario hacer uso de dispositivos electrónicos para acondicionar la señal y pueda ser leída por un convertidor analógico-digital para su posterior procesamiento y visualización, el conjunto de dispositivos que realizan esta tarea es llamado radiómetro.

Se puede definir a la radiometría como la medición de la radiación electromagnética. Para medir esta radiación se emplea un radiómetro, el cual hace uso de un receptor capaz de medir bajos niveles de radiación de microondas.

Existen varios tipos de radiómetros, en la tabla 3.1 se muestran algunos y sus principales características.

Un radiómetro está compuesto de diferentes dispositivos y dependiendo del tipo de radiómetro y su configuración, entonces ocupará un número mayor o menor de componentes, sin embargo, a grandes rasgos el radiómetro en su forma más general se compone de los siguientes elementos:

- Filtro pasabandas

- Amplificador de bajo ruido

- Detector

| No. | Tipo de radiómetro | Características principales |
|-----|--------------------|--|
| 1 | Dicke | Es el radiómetro más simple. En este tipo de radiómetro no se mide directamente la temperatura de la antena sino que se mide la diferencia entre la temperatura de la antena y una temperatura de referencia conocida. |
| 2 | Inyección de ruido | Toma como base el radiómetro de Dicke. Se emplea una ganancia en realimentación. La temperatura de referencia y la temperatura de la antena son iguales y su salida es cero. |
| 3 | Correlación | Es un sistema multicanal, se emplea donde se debe medir dos temperaturas de brillo, así como la correlación entre ellas. |
| 4 | Híbrido | Se emplea un filtro pasabandas, conversor ADC y un procesador digital como puede ser una PC o un sistema basado en FPGA, dentro del procesador se realiza la integración numérica. |

Tabla 3.1: Tipos de radiómetros y sus características principales [24].

- Dispositivo para calibrar o de referencia
- *Switch* mecánico
- Líneas de transmisión

En la figura 3.1 se observan los componentes de forma general de un radiómetro. En el caso del presente trabajo, se emplea un radiómetro híbrido ya que se hace uso de un sistema basado en FPGA para el procesamiento, este sistema es llamado *ROACH 2*, es desarrollado por la Universidad de Berkeley y se hablará de este en el capítulo 5.

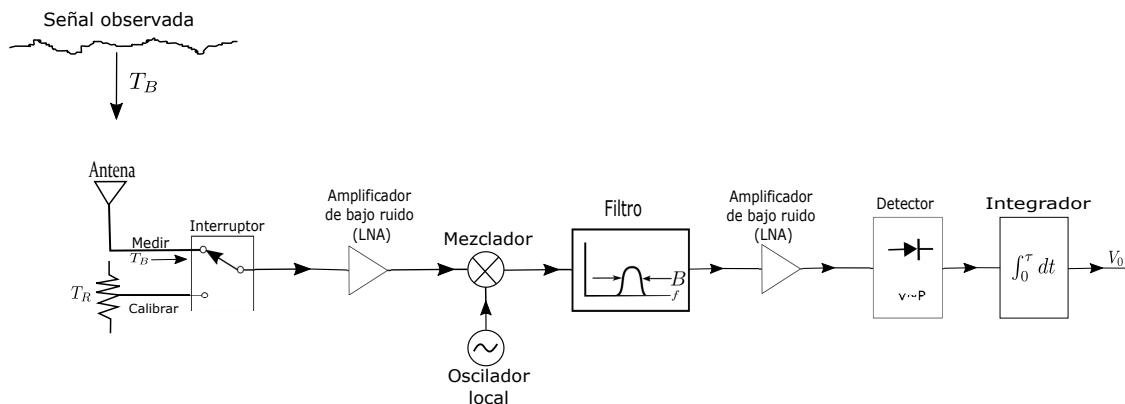


Figura 3.1: Diagrama general de un radiómetro [25].

En el presente trabajo, se identifican dos etapas de acondicionamiento de señal. La primera etapa corresponde a la que se encuentra enseguida de la antena y la segunda se encuentra después

del cable que une ambas etapas, la segunda etapa se coloca justo antes de la entrada del ADC de la tarjeta *ROACH 2*. A continuación se describen las etapas de acondicionamiento de señal y los dispositivos empleados en cada una.

3.1. Amplificación

La señal proporcionada por la antena receptora es muy débil, puede ser del rango de microvolts o milivolts por lo que se hace necesario el uso de un amplificador de señales. La señal de salida del amplificador es la misma que en la entrada pero de mayor magnitud. Debido a que los componentes electrónicos generan ruido el cual se mezcla con la señal recibida, se emplean amplificadores de bajo ruido (LNA, por sus siglas en inglés), estos amplificadores aportan bajo ruido, ganancia razonable, linealidad y estabilidad sin oscilaciones en un amplio rango de frecuencias [26]. Su función principal, al igual que los otros amplificadores, es amplificar señales extremadamente bajas sin agregar ruido o agregando el menor ruido posible.

Se busca que los componentes electrónicos que se emplean en este sistema inserten la menor cantidad de ruido. Una de las etapas más importantes de un radiómetro es la amplificación de la señal, ya que de esta dependerá la potencia con la que llegará al convertidor analógico-digital. El amplificador de bajo ruido seleccionado es el ZX60-33LN de Mini-Circuits, tiene una ganancia de 21.9 dB e inserción de ruido de 1.6 dB en el rango de frecuencia de interés [27]. El número de amplificadores, tanto en la primera y segunda etapa, está en función de la potencia que se quiera entregar a la etapa de procesamiento y de la atenuación que sufra la señal al transmitirse por los diferentes componentes y por los cables coaxiales. En la figura 3.2 se muestra el amplificador de bajo ruido.



Figura 3.2: Amplificador LNA ZX60-33LN de Mini-Circuits.

3.2. Filtrado

El rango de frecuencias sobre el que SCI-HI busca la señal de Hidrógeno Neutro va de los 40 MHz a los 120 MHz, por lo que se hace uso de un filtro pasabandas para ese rango. Para formar el filtro pasabandas es necesario hacer uso de dos filtros, en el caso del filtro pasa altas, el seleccionado es el SHP-50+ de Mini-Circuits, su rango de trabajo va de 41 a 800 MHz y para el filtro pasa bajas se selecciona el SLP-100+ también de Mini-Circuits, su rango de trabajo va desde DC hasta 98 MHz [28] [29]. De esta forma se tiene un filtro pasa bandas en el rango de frecuencias de 40 MHz a 100 MHz con algunas variaciones debido a las frecuencias de corte de ambos filtros. El rango de trabajo de la antena es de 70 MHz a 120 MHz por lo que el uso de estos filtros es adecuado. En la figura 3.3 se muestran ambos filtros.



(a) Filtro pasa altas SHP-50+.

(b) Filtro pasa bajas SLP-100+.

Figura 3.3: Dispositivos que forman el filtro pasabandas en el rango de 40 MHz a 100 MHz.

3.3. Calibración

Además de los amplificadores de bajo ruido y el filtro pasa bandas, se requiere de otros dispositivos que complementan el radiómetro. Se agregan atenuadores, el valor y número de estos varía en función de la atenuación que se quiera hacer del ruido y afectando lo mínimo posible lo captado por la antena. Se agrega también un interruptor mecánico MSP6TA-12+ de Mini-Circuits, que cuenta con seis conectores o entradas y tiene un rango de trabajo que va desde DC hasta 12 GHz [30], el tiempo de conmutación entre terminales es de 20 milisegundos. A las entradas del interruptor se conectan los terminales de calibración como lo son carga de 50 Ω , *open*, *short* y el conector de la antena. La conmutación entre las entradas se realiza mediante un programa en Python y un circuito de potencia. En la figura 3.4 se muestra el interruptor mecánico.

Debido a que el interruptor mecánico realiza las conmutaciones con voltajes que van de los 12 V a los 24 V, se requiere de una etapa de potencia y que brinde aislamiento a las terminales del Raspberry, ya que sus salidas solo entregan un voltaje de 3.3 V y corriente de 16 mA [31], en la

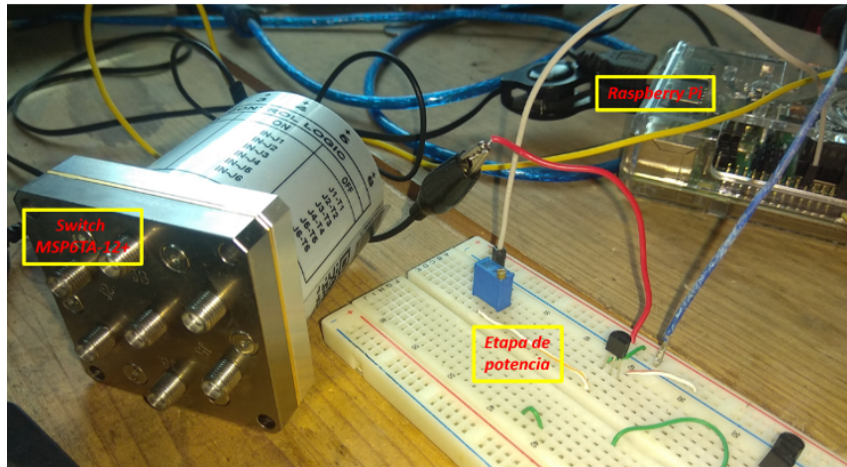
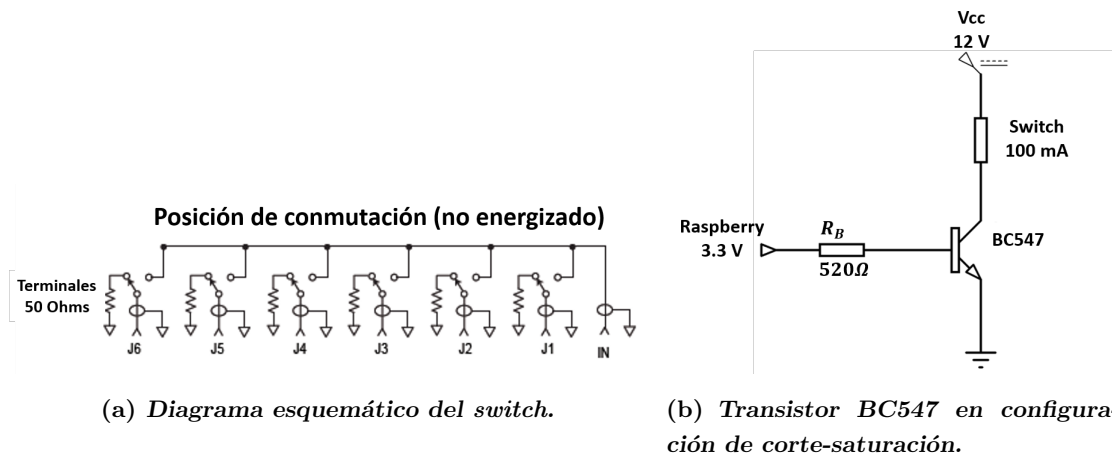


Figura 3.4: Interruptor mecánico MSP6TA-12+ de Mini-Circuits.



(a) Diagrama esquemático del switch.

(b) Transistor BC547 en configuración de corte-saturación.

Figura 3.5: Configuración del switch, circuito de potencia y control.

figura 3.5 se muestra el circuito que se emplea para la etapa de potencia y control del interruptor así como el diagrama esquemático del interruptor. El transistor BC547 en su configuración de corte-saturación, es decir, como interruptor es capaz de manejar esos voltajes (12 V) y suministrar la corriente que el interruptor requiere (100 mA) para realizar las conmutaciones entre las entradas [32].

La resistencia de base del transistor tiene un valor de 520Ω , con lo que la corriente de base es 5 mA, esta corriente de base es la que permite encender o apagar el transistor sin dañar los pines del Raspberry, con esto se asegura una corriente de saturación de 100 mA (corriente de funcionamiento del *switch*) en el colector cuando los pines de salida de Raspberry se activan.

3.4. Conclusiones

El uso de dispositivos especializados y de bajo ruido influyen en el acondicionamiento de la señal. Los LNA además de amplificar las señales agregan poco ruido, el cual se atenúa usando atenuadores de valores diferentes con lo que la señal o lo captado por la antena es más fiel. Los filtros pasa altas y pasa bajas atenúan las frecuencias que están fuera de sus rangos de operación por lo que forman un filtro pasabandas y con esto se consigue un rango de frecuencias más estrecho en el cual se encuentra la frecuencia de señal buscada. Al usar transistores en su configuración de corte-saturación se protegen los pines GPIO de la Raspberry al momento de realizar las conmutaciones, proporcionando la corriente y voltaje que requiere el interruptor mecánico, el cual cuenta con seis entradas y proporciona una única salida con lo que el número de dispositivos empleados se reduce. La transferencia máxima de potencia entre dispositivos se logra ya que todos los dispositivos mencionados tienen conectores de 50Ω con lo que no es necesario calibrarlos o agregar otros dispositivos para el acoplamiento de impedancias.

Capítulo 4

Antena Mango Peel

Una antena es la parte de un sistema de comunicaciones que es la encargada de radiar o recibir las señales provenientes de una línea de transmisión o guía de onda, es decir, la antena es el dispositivo de transición entre una señal guiada y el espacio libre ya como onda de campo electromagnético. Hay varios tipos de antenas, desde las más simples como son las antenas de alambre y su forma de radiación es más sencilla, hasta las más complejas que emplean conjuntos o arreglos de antenas para mejorar o ampliar las características que posee un solo elemento, también existen las antenas para aplicaciones específicas con formas particulares.

Un ejemplo del tipo de antena para aplicaciones específicas es la empleada en el presente trabajo, esta antena tiene como base la antena *Hibiscus* [33] la cual a su vez, está basada en la antena de cuatro cuadros [34], la antena de cuatro cuadros es una antena plana ya que se construye o fabrica sobre sustrato dieléctrico plano, está formada por cuatro elementos metálicos radiantes, es decir, está formada por dos dipolos cruzados, cada uno de los cuatro elementos que conforman esta antena tiene forma cuadrada o romboidal (existen configuraciones con otras formas de los elementos radiantes [35]), ver figura 4.1, la antena se encuentra colocada sobre un plano de tierra a una determinada distancia que está relacionada con la longitud de onda para la cual se diseña la antena.

La antena *Hibiscus* se basa en el diseño de la antena de cuatro cuadros. De la antena de cuatro cuadros se modifica la forma de los elementos radiantes, pasan de tener una forma romboidal o cuadrada como se muestra en la figura 4.2 a tener una base triangular seguido por dos trapecios, además ya no se construye sobre un único plano y pasa a realizarse un dobléz en las aristas coincidentes de la base del triángulo con el trapecio de mayor tamaño. Se realiza un dobléz en la arista de la base menor de este con la base mayor del siguiente trapecio como se muestra en la figura 4.2, en la misma figura se muestra el dobléz tipo aleta con forma de paralelogramo que se realiza a las dos aristas restantes del triángulo, estas aletas forman un ángulo de 100.6° con el plano del triángulo.

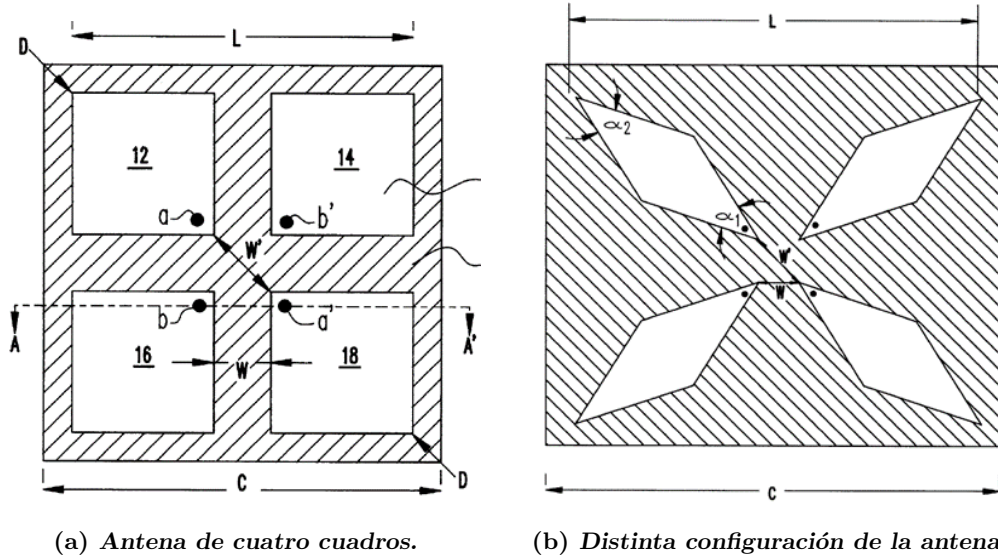


Figura 4.1: Configuraciones diferentes de antenas de cuatro puntos [36].

4.1. Diseño

La antena *Mango Peel* que se presenta en este tema de tesis es una mejora de la antena *Hibiscus* [55]. En este nuevo diseño de antena cada uno de los elementos radiantes consta de 4 superficies planas, su antecesora (*Hibiscus*) está formada de cinco superficies planas. Los cambios realizados se observan en la sustitución de los dos trapecios y el respectivo ángulo entre ellos por una sola superficie plana con forma parabólica, otro cambio es el tamaño de la base del triángulo y su altura; aunado a estos cambios, también se modifican los dobles en los lados del triángulo, dejan de ser paralelogramos y toman una forma de segmento de elipse. En la figura 4.3 se observan dichos cambios desde una vista superior.

La antena *Mango Peel* está basada en la *Hibiscus* y en su funcionamiento. Los elementos radiantes de la antena *Mango Peel* forman un dipolo cruzado cuando son conectados los cuatro de forma diagonal y generan polarizaciones circular o elíptica. Cuando se conectan solo dos elementos de forma diagonal se genera polarización lineal, en este caso los elementos restantes actúan como elementos parásitos y ayudan a mejorar la respuesta de la antena. Para la aplicación del presente trabajo solo se conectan dos elementos radiantes.

A partir de un elemento radiante ya construido se obtienen sus dimensiones y con esto determinar la frecuencia de diseño. El objetivo de esto es reproducirlo en un software de diseño asistido por computadora y que permita realizar simulaciones de antenas, de esta forma obtener la configuración adecuada de acuerdo a los requerimientos que se solicitan, en la figura 4.4 se muestran las dimensiones así como la forma de un elemento radiante de la antena *Mango Peel*.

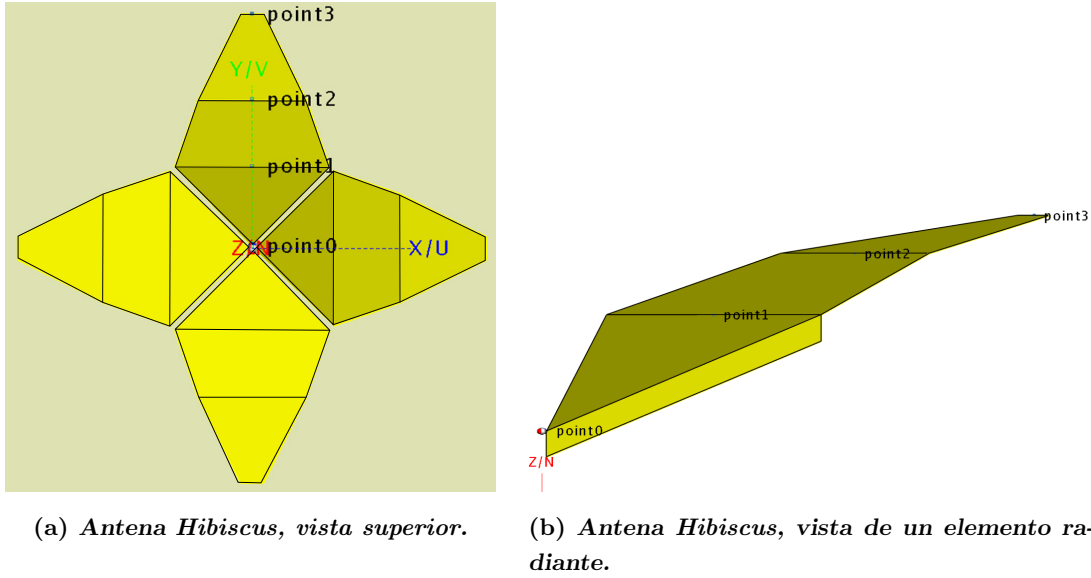


Figura 4.2: Diseño de la antena *Hibiscus*.

Las dimensiones de los elementos y los ángulos entre sus superficies son fijos ya que los elementos están fabricados. Para mejorar y/o variar el ancho de banda y la directividad, así como el coeficiente de reflexión se varía la altura de la antena con respecto al plano de tierra y la separación entre elementos de forma diagonal, además se varía el ángulo de inclinación de los elementos con respecto a un plano horizontal, de esta forma se tienen tres grados de libertad para la antena, en la figura 4.5 se muestran las medidas y ángulos de un elemento de antena, además de los parámetros que se varían para mejorar su rendimiento; estos parámetros son la distancia d_1 , la altura h_1 y el ángulo α .

De la figura 4.5 se tienen los tres parámetros que se varían:

- α es el ángulo que hay entre el segmento l_1 y el plano horizontal. Al variar α todo el elemento radiante se mueve, los ángulos restantes entre superficies conservan sus valores.
- La distancia d_1 es la distancia que hay entre el punto más inferior de un elemento radiante y un eje de referencia vertical en el centro de los cuatro elementos.
- La altura h_1 es la distancia que hay entre el punto más inferior de los elementos radiantes con respecto al plano reflector.

La antena *Mango Peel* está basada en una antena de tipo dipolo de media onda ($\lambda/2$), se parte de esta premisa para encontrar la frecuencia de diseño de la antena. Esta frecuencia está dada por la distancia D que es la mitad de la longitud de onda, ver figura 4.3, la distancia D a su vez estará en función de los parámetros d_1 y del ángulo de inclinación α de la siguiente forma:

$$D = 2(d_1 + l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \Delta + l_3 \cos \gamma) \quad (4.1)$$

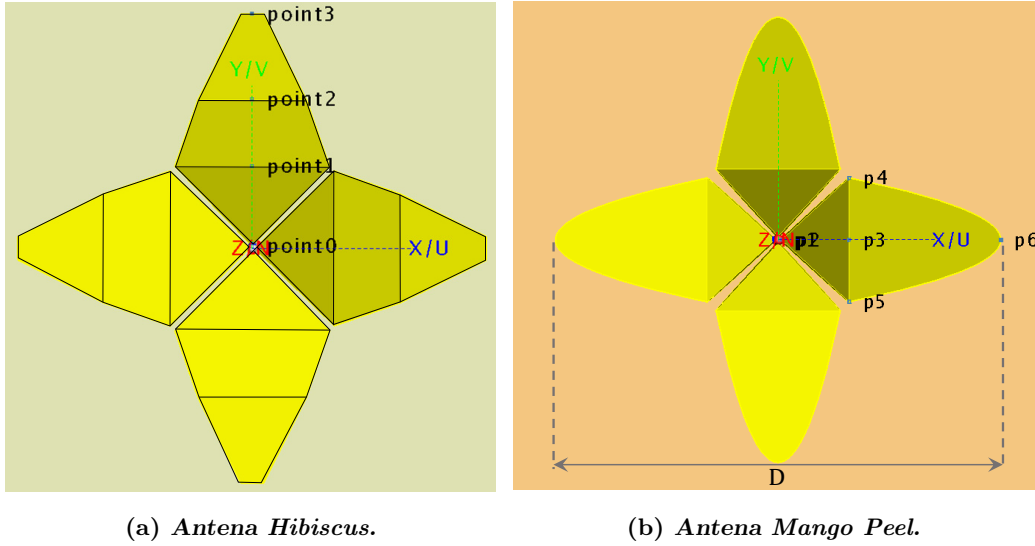


Figura 4.3: Comparación en forma de las antenas Hibiscus y Mango Peel.

donde:

- $\alpha = 90^\circ - comp$
- $\Delta = 49.5^\circ - comp$
- $\gamma = 23.5^\circ - comp$

α , Δ y γ son los ángulos que las longitudes l_1 , l_2 y l_3 forman con respecto a la horizontal respectivamente, $comp$ es un ángulo de compensación, este se varía para cambiar la respuesta de la antena, así mismo permite mantener los mismos valores de los ángulos (139.5° y 154°) que se forman entre los tres segmentos, se resta en los tres ángulos.

Tomando como referencia las ecuaciones 2.1 y 4.1 se tiene:

$$f = \frac{c}{2D} \quad (4.2)$$

considerando la dimensiones obtenidas de los elementos de la antena y proponiendo algunos valores para $d_1 = 7.5$ mm y $comp = 0^\circ$, se obtiene el valor de D :

$$D = 2(d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \quad (4.3)$$

donde:

- $d_1 = 7.5$ mm
- $d_2 = 120 \cos(\alpha) = 0$ mm
- $d_3 = 475 \cos(\Delta) = 308.487$ mm

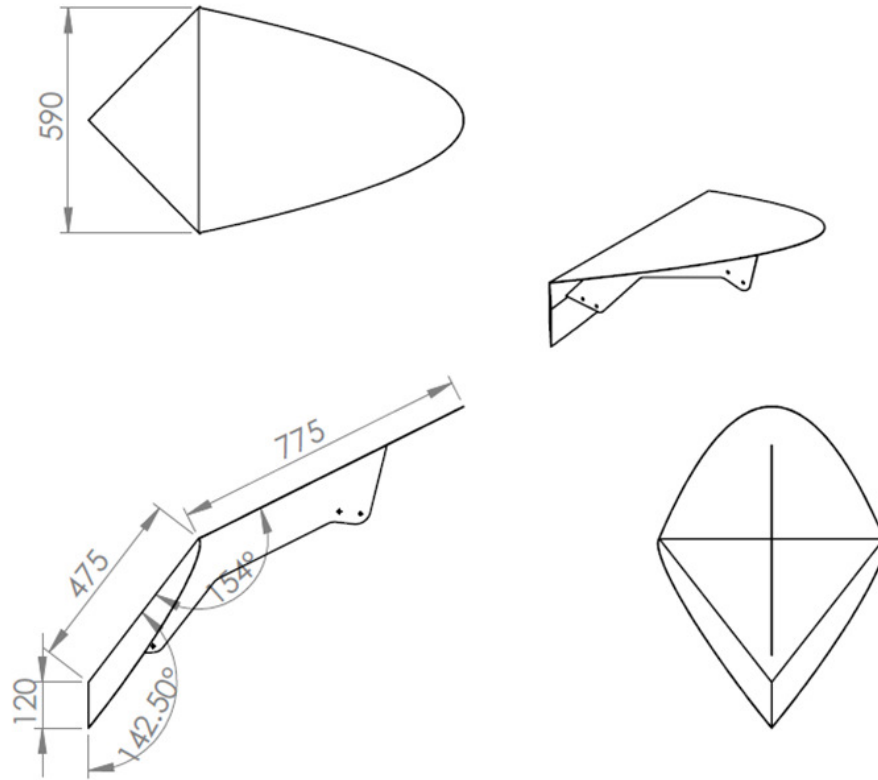


Figura 4.4: Plano y medidas de un elemento radiante de la antena Mango Peel, las medidas están dadas en milímetros.

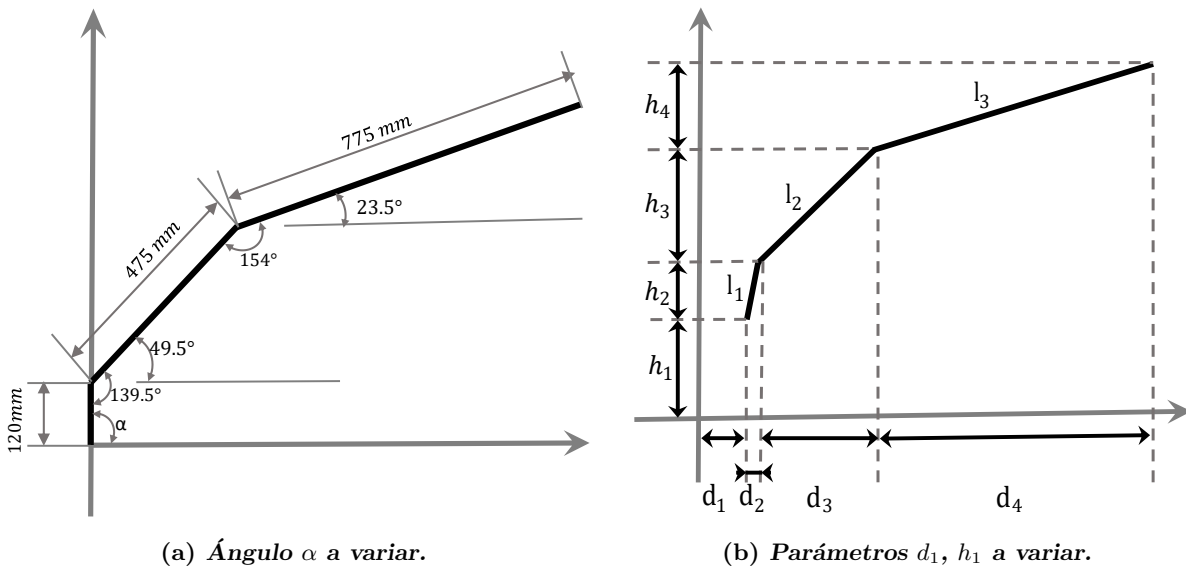


Figura 4.5: Parámetros variables de la antena Mango Peel.

- $d_4 = 775 \cos(\gamma) = 710.721 \text{ mm}$

de esta forma se tiene que:

$$D = 2(7.5 + 308.487 + 710.721) \text{ mm}$$

$$D = 2.053 \text{ m}$$

despejando f de 4.2 se tiene:

$$\begin{aligned} f &= \frac{300\,000\,000 \text{ m/s}}{4.106\,834\,23 \text{ m}} \\ &= 73.048 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (4.4)$$

se encuentra que el valor de la frecuencia de diseño para esta configuración es $f = 73.048$ MHz. Al variar los valores de d_1 y α los resultados con respecto a la frecuencia de diseño varían ligeramente pero manteniéndose en el rango de los 70 MHz.

Por otro lado, si se considera la longitud total de los elementos radiantes y midiendo de forma diagonal, entonces la frecuencia de resonancia corresponde a los 60 MHz tal como se muestra a continuación:

$$D = 2(475 + 775) \text{ mm} = 1.25 \text{ m} \quad (4.5)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{300\,000\,000 \text{ m/s}}{5 \text{ m}} = 60 \text{ MHz} \quad (4.6)$$

Por su forma geométrica, la antena *Mango Peel* se basa en las antenas tipo *bow tie*, en este tipo de antenas, de moño o triangulares, la corriente termina abruptamente [22], esto implica que su ancho de banda sea limitado, la antena *Mango Peel* tiene terminación de forma parabólica en sus extremos, esto permite que la corriente se vaya atenuando conforme la longitud del dipolo aumenta. El ancho de banda de este tipo de antenas depende principalmente del ángulo de separación entre elementos y del ángulo de apertura de los triángulos [37], este ángulo oscila generalmente entre 30° y 90° [21], en el caso de la antena *Mango Peel* el ángulo de apertura del triángulo es de 63.7° .

4.2. Simulación

Una vez construidos los elementos de la antena *Mango Peel* es posible modificar su respuesta. Para modificar la respuesta de la antena se varían los parámetros ajenos al tamaño y forma de los elementos radiantes, tales parámetros son la separación entre elementos de la antena, la altura de los mismos con respecto al plano de tierra y por último el ángulo (α) con respecto a un plano horizontal.

La aplicación para la que se diseñó esta antena se busca que tenga un buen ancho de banda, buena directividad y un coeficiente de reflexión plano. Se realizan combinaciones de los tres

parámetros descritos con anterioridad con el fin de encontrar la mejor respuesta. En el mercado hay varias aplicaciones de escritorio que están diseñadas para realizar simulaciones de antenas algunas de ellas son de distribución libre como Altair Hyperworks Student Edition, EMCoS Antenna VLab SV versión de estudiante, GLMoM, gprMax, MMANA-GAL (versión básica), NEC2, openEMS; algunos de estos requieren registrarse y tienen licencias por cierto tiempo, algunos otros no tienen interfaz gráfica. Otras aplicaciones son de paga tales como GEMACS Electromagnetic Modeling, Altair Hyperworks FEKO, ANSYS HFSS, DS SIMULIA Software de simulación electromagnética Análisis de EM, COMSOL RF Module, MMANA-GAL (Pro Version), EMWORKS Hf Antenna Design, EM Slice, EMCoS, AN-SOF. Para resolver o aproximar las ecuaciones de Maxwell, estos programas emplean métodos numéricos tales como Método de Momento (MoM), Método de Elemento Finito (FEM), Diferencia Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD), entre otros.

Se emplea FEKO para realizar las simulaciones, licencia facilitada por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). El *solver* o *kernel* de FEKO está basado principalmente la técnica de Método de Momentos (genera triángulos en la superficie y aproxima las ecuaciones de Maxwell en los contornos), sin embargo, incorpora otras herramientas con las que resuelve una gran cantidad de problemas para elementos con formas arbitrarias, algunas de estas herramientas son Método Multipolar Rápido Multinivel (MLFMM), Método de Elemento Finito (FEM), Teoría Uniforme de Difracción (UTD), Óptica geométrica y óptica física (PO); además se añaden otras extensiones especiales para habilitar el modelado de medios magnéticos y dieléctricos. Permite seleccionar la técnica con la que se quiere resolver o aproximar las ecuaciones de Maxwell.

FEKO consta de algunos módulos o subprogramas con funciones específicas. Con CADFEKO se realiza la construcción y configuración de la antena, además se asignan los rangos de frecuencias, puertos de alimentación e impedancia de los conectores, entre otras configuraciones; desde aquí se realiza la simulación. Para la visualización de los resultados de la simulación se emplea POSTFEKO, esta interfaz permite visualizar el patrón de radiación en dos y tres dimensiones, el coeficiente de reflexión o parámetros S11, la distribución de las corrientes, entre otros resultados, todo esto a diferentes frecuencias. Desde POSTFEKO es posible guardar las gráficas y/o exportar los datos para procesarlos con algún otro software como lo es MATLAB [38].

4.2.1. Variación de altura

En [36] se recomienda una separación de la antena con respecto del plano de tierra de un cuarto de la longitud de onda a la que está diseñada la antena. Esta altura depende de la respuesta que se requiera en la antena, otro dato a tomar en cuenta es que las antenas a las que se hace referencia son antenas construidas sobre sustrato dieléctrico plano, además la permitividad

relativa del sustrato dieléctrico también influye en su respuesta.

Para determinar cómo la variación de los parámetros afectan la respuesta de la antena, se varía en primer lugar la altura h_1 , dejando los otros dos parámetros constantes, se toman seis valores diferentes de h_1 , por lo tanto se tienen los siguientes valores:

- $\alpha = 0^\circ$
- $d_1 = 20$ mm
- $h_1 = 250$ mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm, 450 mm, 500 mm

En la figura 4.6 se observa el coeficiente de reflexión cuando se varía la altura y la figura 4.7 muestra el cambio en ganancia y forma del patrón de radiación cuando se varía h_1 , se toman las 6 mismas frecuencias de muestra a las alturas $h_1 = 300$ mm y $h_1 = 500$ mm para observar cómo influye la altura en el patrón de radiación.

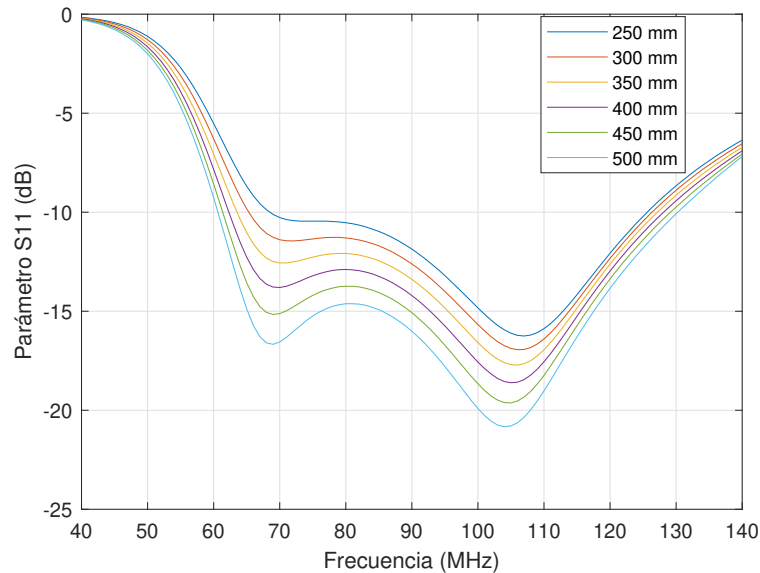


Figura 4.6: Coeficiente de reflexión al variar la altura con respecto del plano de tierra.

La figura 4.6 muestra que la variación en la altura de la antena influye poco en que el coeficiente de reflexión sea plano o no lo sea. Al aumentar la altura es evidente que el ancho de banda por debajo de los -10 dB también aumenta y se conserva la misma forma del coeficiente de reflexión; las frecuencias de resonancia también se recorren a frecuencias más bajas. Con respecto a la figura 4.7, se tiene que conforme la altura aumenta, disminuye la ganancia y el patrón de radiación se hace menos direccional en el mismo rango de frecuencias. Cuanto más cerca del plano reflector, el patrón de radiación es más uniforme y con poca variación.

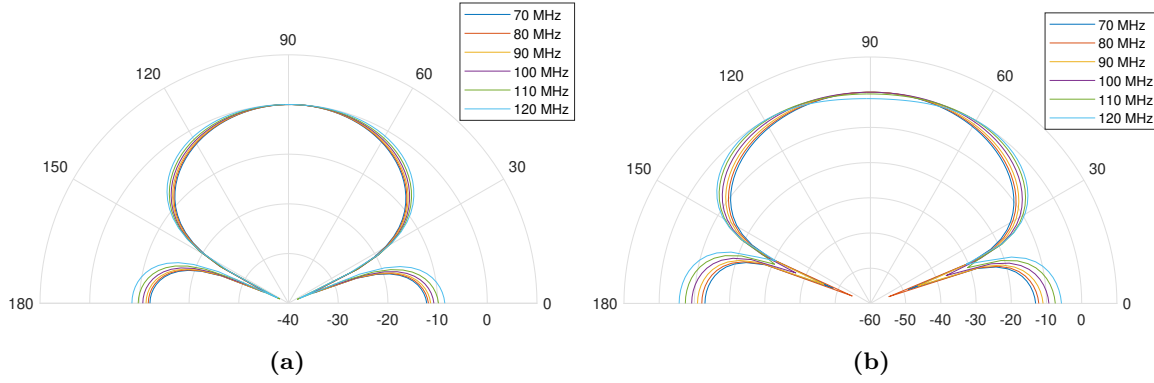


Figura 4.7: Patrón de radiación a diferentes alturas. a) $h_1 = 300$ mm, b) $h_1 = 500$ mm.

4.2.2. Variación de separación entre elementos

El segundo parámetro a variar es la separación de los elementos (d_1) de forma diagonal. Para este caso se dejan constantes los valores de los dos parámetros restantes (h_1, α), mientras que para d_1 se proponen 5 valores. En [36] se menciona que la separación entre elementos debe ser mucho menor que la longitud de onda, es decir $\lambda \gg d_1$, sin embargo, no se da referencia de alguna relación entre ambas cantidades o de algún valor aproximado o sugerido. Para determinar la influencia en el coeficiente de reflexión y patrón de radiación al variar d_1 , se realizan las simulaciones tomando los siguientes valores:

- $h_1 = 300$ mm
- $\alpha = 0^\circ$
- $d_1 = 5$ mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm

De la figura 4.8 se observa que cuando se varía la distancia d_1 el coeficiente de reflexión o parámetro S11, tiende a aumentar la ganancia de la frecuencia de resonancia. Se observa que cuando la separación entre elementos es de $d_1 = 5$ mm, la ganancia es mínima y el ancho de banda es mínimo. Cuando los valores de d_1 están entre 15 mm y 20 mm se observa que el coeficiente de reflexión tiende a ser más plano y con un ancho de banda similar. Para los valores de $d_1 = 10$ mm y $d_1 = 25$ mm se tienen ganancias muy marcadas en ciertas frecuencias.

Con respecto al patrón de radiación, en la figura 4.9 se muestran los diagramas de radiación para $d_1 = 5$ mm y $d_1 = 25$ mm. Al mantener la altura constante, los diagramas de radiación mantienen la misma forma y su ganancia varía poco en ese rango de frecuencia. Por lo tanto, es evidente que la separación entre elementos influye en el coeficiente de reflexión, puede aplanarlo y también hacer que tenga mayor resonancia en algunas frecuencias, tiene poca influencia en la forma y ganancia del patrón de radiación.

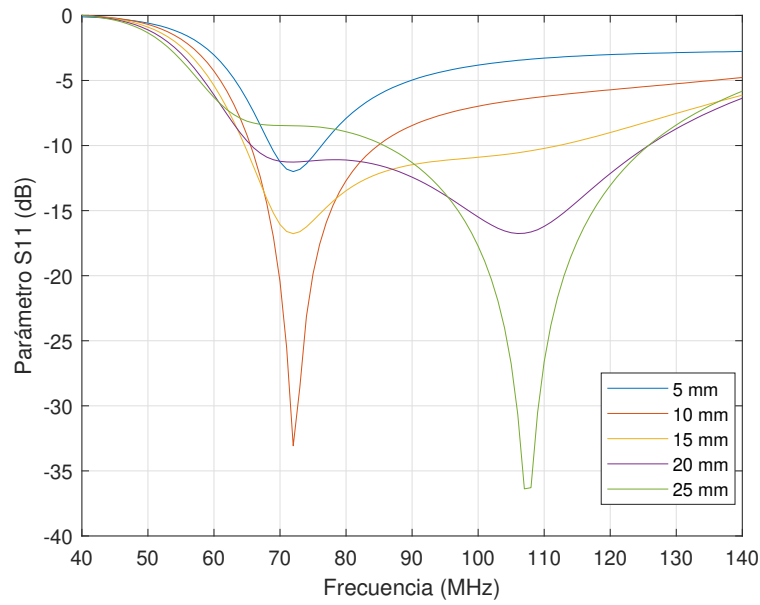


Figura 4.8: Coeficiente de reflexión al variar la separación de los elementos.

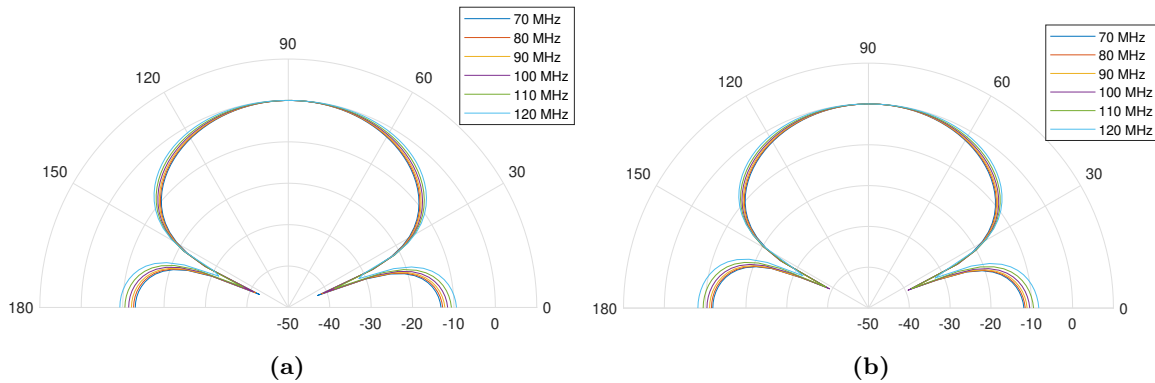


Figura 4.9: Patrón de radiación con diferentes separación. a) $d_1 = 5$ mm, b) $d_1 = 25$ mm.

4.2.3. Variación de ángulo α

El tercer parámetro que se varía es el ángulo α . Para determinar la influencia en la respuesta de la antena, se toman tres valores del ángulo mientras que los otros dos parámetros (d_1 , h_1) permanecen constantes. El parámetro que se varía es el ángulo denominado *comp* el cual se resta de α , se asignan los valores de 5° , 3° y 0° , de esta manera, las simulaciones se realizan tomando los siguientes valores:

- $d_1 = 15$ mm
- $h_1 = 300$ mm
- $\alpha = 85^\circ, 87^\circ, 90^\circ$

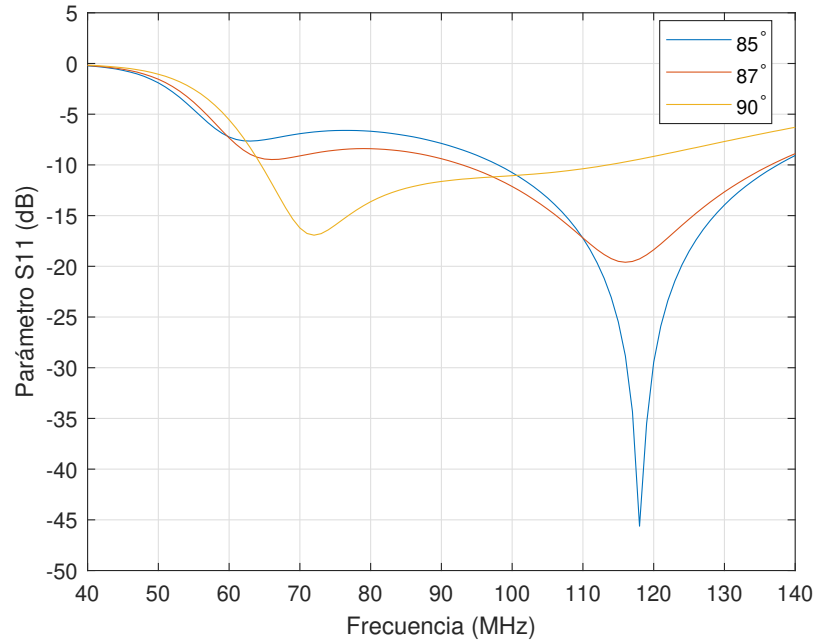


Figura 4.10: Coeficiente de reflexión al variar el ángulo α .

Al variar el ángulo α se observa que influye en el coeficiente de reflexión, ver figura 4.10. Cuanto menor es el ángulo α ($\alpha = 85^\circ$) es más remarcada la ganancia en alguna frecuencia y su ancho de banda es menor. Conforme el ángulo α se acerca a 90° , se observa que el coeficiente de reflexión es más plano y su ancho de banda también incrementa.

En el caso del patrón de radiación, al mantener una altura constante se espera que varíe poco. En la figura 4.11 se observa que hay similitud en ambas figuras. Se encuentra que cuando $\alpha = 90^\circ$ la ganancia es mayor.

4.2.4. Resultados

A partir de la respuesta observada en las simulaciones se obtiene una configuración que cumple con lo que se requiere. Varias configuraciones con valores cercanos a los que se presentan tienen o generan una respuesta cercana a la solicitada. De la simulación iterativa se obtiene que cuánto más cerca está la antena del plano de tierra el patrón de radiación tiende a ser más direccional en el rango de frecuencia de interés, para este caso no aplica la distancia de $h_1 = \lambda/4$; por otro lado, la separación entre elementos se encuentra que debe ser de alrededor de $\lambda/135$ con lo que se cumple que $\lambda \gg d_1$; por último, se tiene que un ángulo $\alpha = 90^\circ$ genera una respuesta más plana, además de ser más fácil de alcanzar a la hora de ensamblar la antena.

Se proponen los siguientes valores con los cuales se alcanza la respuesta presentada en las figuras 4.12 y 4.13:

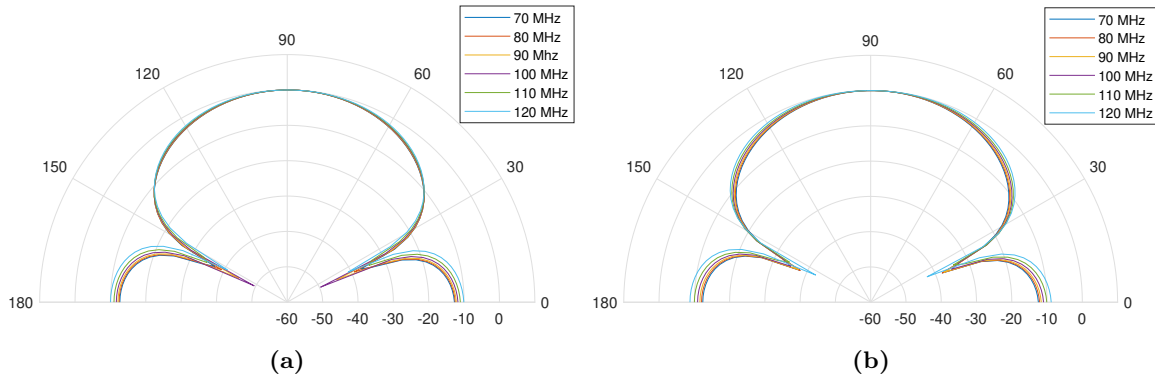


Figura 4.11: Patrón de radiación con diferentes valores de α . a) $\alpha = 85^\circ$, b) $\alpha = 90^\circ$.

- $h_1 = 250$ mm
- $d_1 = 17$ mm
- $\alpha = 90^\circ$

con esta configuración se tiene una frecuencia de diseño de $f = 72.397$ MHz, el cual coincide con lo mostrado en la figura 4.12.

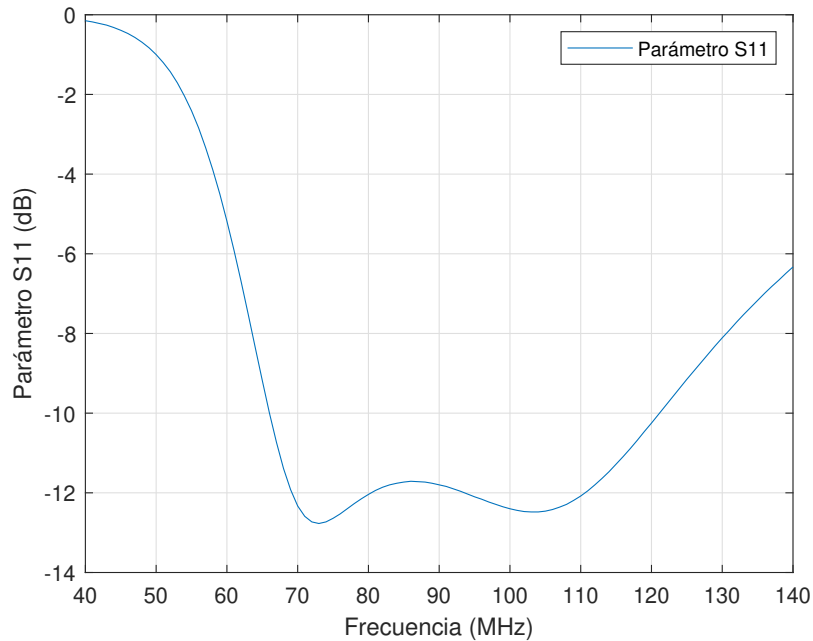


Figura 4.12: Coeficiente de reflexión configuración final.

De la figura 4.12 se tiene que el ancho de banda con respecto al coeficiente de reflexión por debajo de los -10 dB va desde $f = 65$ MHz a $f = 120$ MHz, sin embargo la parte donde hay menos

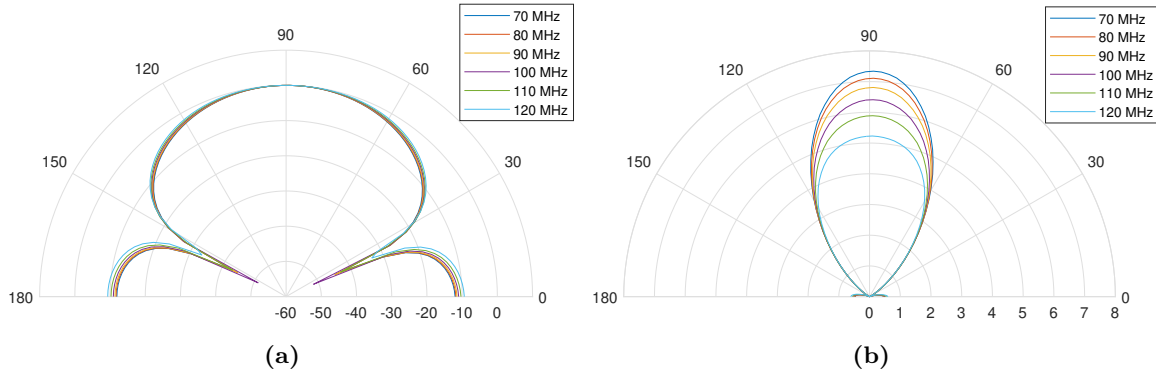


Figura 4.13: Patrón de radiación configuración final. a) Escala logarítmica (dBi). b) Escala lineal.

variación (1 dB) es la que corresponde a $f = 70-110$ MHz, dando un ancho de banda de 40 MHz.

En la figura 4.13 se aprecia lo obtenido con esta configuración con respecto al patrón de radiación. En la figura 4.13(a) se observa en escala logarítmica la respuesta, se presenta la misma forma del patrón de radiación en el rango de frecuencia de interés. Por otra parte, en la figura 4.13(b) se observa la ganancia de la antena en escala lineal, para la frecuencia $f = 70$ MHz la ganancia es de 7 y para la frecuencia $f = 120$ MHz la ganancia es ligeramente superior a 5. Sin embargo se tiene que la forma del patrón es direccional en todo el rango de frecuencias. En la figura 4.14 se muestra el *Half-power beamwidth* (*HPBW*) o ancho de haz de media potencia, para la frecuencia inferior $f = 70$ MHz se tiene un *HPBW* de 60.5° y para la frecuencia superior $f = 120$ MHz el *HPBW* es de 70.5° . Para las frecuencias intermedias, se tiene un *HPBW* en este rango de valores.

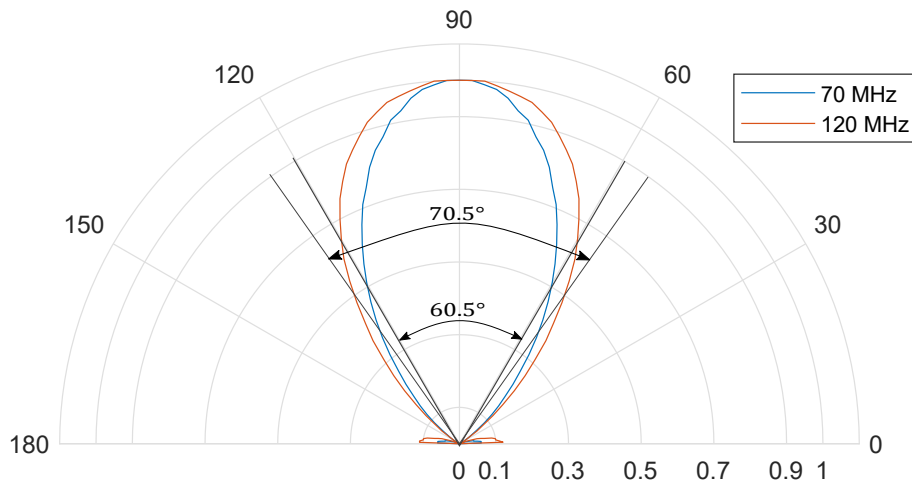


Figura 4.14: *Half-power beamwidth* para frecuencia inicial y final.

A partir de la respuesta obtenida de las simulaciones se tiene lo siguiente:

- La variación del ángulo α influye en que el coeficiente de reflexión sea plano o la ganancia

sea más remarcada en alguna frecuencia.

- La separación entre elementos repercute en el coeficiente de reflexión haciéndolo plano.
- La altura con respecto al plano de tierra tiene influencia en la patrón de radiación, entre más cerca esté del plano, el patrón será más direccional. Repercute de igual manera en el ancho de banda de la antena, cuanto más alejada esté del plano, su ancho de banda será mayor; con la desventaja de que su ganancia y directividad decrecen.

Para lograr una determinada posición de los elementos radiantes de la antena, se requiere de una base ya sea diseñada de forma precisa con determinadas dimensiones que permitan llegar a la posición requerida o alguna que permita modificar los tres parámetros que se mencionan con anterioridad y llegar a la posición deseada. Se tiene la restricción de que la base debe ser construida de material dieléctrico para interferir lo menos posible con el desempeño de la antena y esta sea resistente al clima, además de que proporcione soporte suficiente contra las ráfagas de viento, tomando lo anterior en cuenta se propone la estructura de la base que se muestra en la figura 4.15. Debido a que este modelo solo tiene un elemento de soporte en la parte inferior, se quiere de elementos de adaptación para darle mayor estabilidad. La base presentada es para cada uno de los elementos radiantes de la antena.

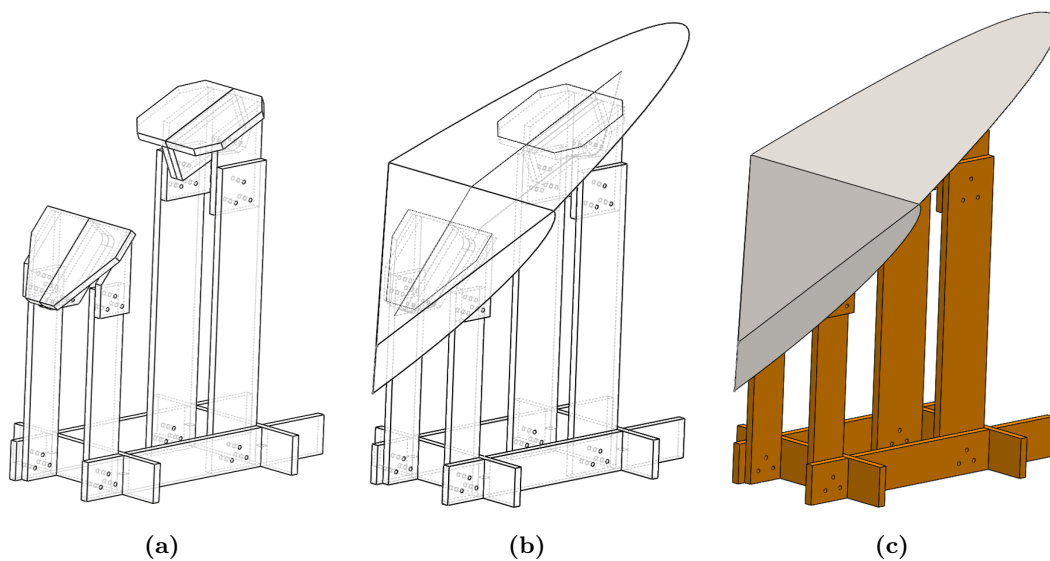


Figura 4.15: Base propuesta para un elemento de la antena.

Se propone una base rígida con dimensiones específicas para llegar a la posición deseada de los elementos. Bajo esta configuración únicamente es la distancia entre elementos la que es variable, esto se consigue al mover todo el elemento. Al estar formada por ensamble de varias piezas se tiene la posibilidad de modificar las piezas de soporte vertical para ajustar la altura de los elementos.

En la figura 4.16 se muestra la propuesta de la base con la antena completa. Para el plano reflector se emplea malla de alambre formando un cuadrado de al menos dos veces la longitud de onda de diseño de la antena por lado.

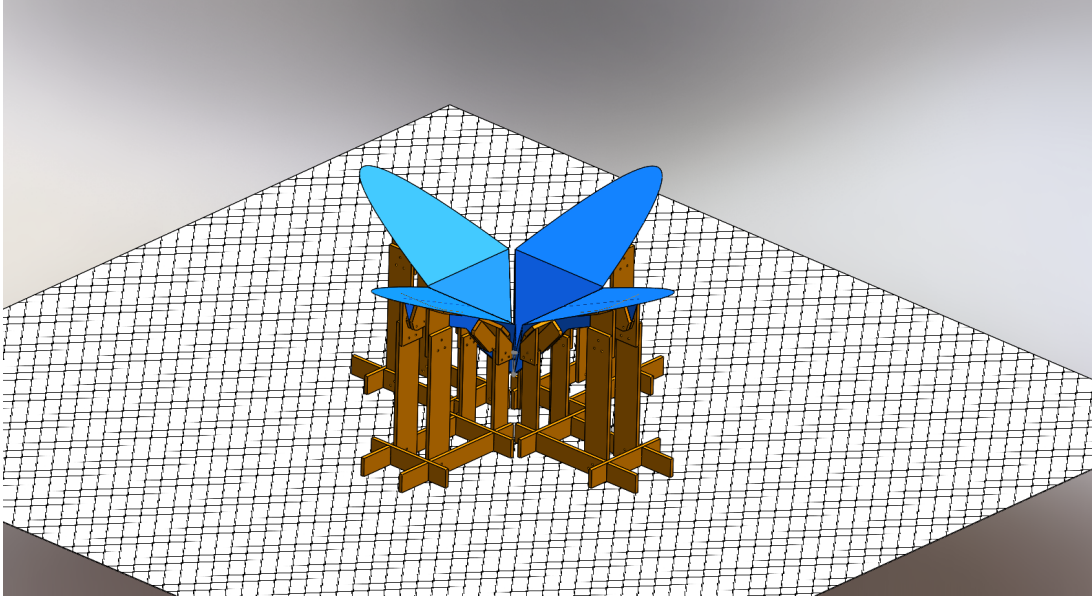


Figura 4.16: Modelo de la antena completa.

En la figura 4.17 se muestran dos elementos de la antena diseñada a una frecuencia de 70 MHz y en la figura 4.18 se muestra la antena a una escala mayor, con frecuencia de resonancia de 50 MHz, con algunas modificaciones como lo es el tamaño de los elementos radiantes y los barrenos en las superficies para un mejor flujo de aire, en esta figura se aprecia la conexión de la antena y las primeras pruebas de medición de coeficiente de reflexión que se hicieron con ella.

El diseño de la antena *Mango Peel* permite redimensionarla para trabajar en otros rangos de frecuencia. Para frecuencias menores a 70 MHz la respuesta es muy similar, para frecuencias superiores su respuesta varía ya que las ondas electromagnéticas son más energéticas.

4.3. Antena *Mango Peel* a escala

Las dimensiones de la antena *Mango Peel* son de aproximadamente 2m de largo por 2m de ancho y cuando se le agrega el plano reflector sus dimensiones crecen aún más. Debido a estas dimensiones se vuelve difícil poder realizar mediciones del patrón de radiación ya que se requiere de una cámara anecóica con espacio suficiente para albergar a la antena y al plano reflector. Para verificar el patrón de radiación y el coeficiente de reflexión se construye una antena a una escala de 1 : 24 de la de tamaño real (70 MHz). Para esta antena se prioriza el ancho de banda por lo que la distancia con respecto al plano de tierra es mayor. Dentro del ancho de banda se

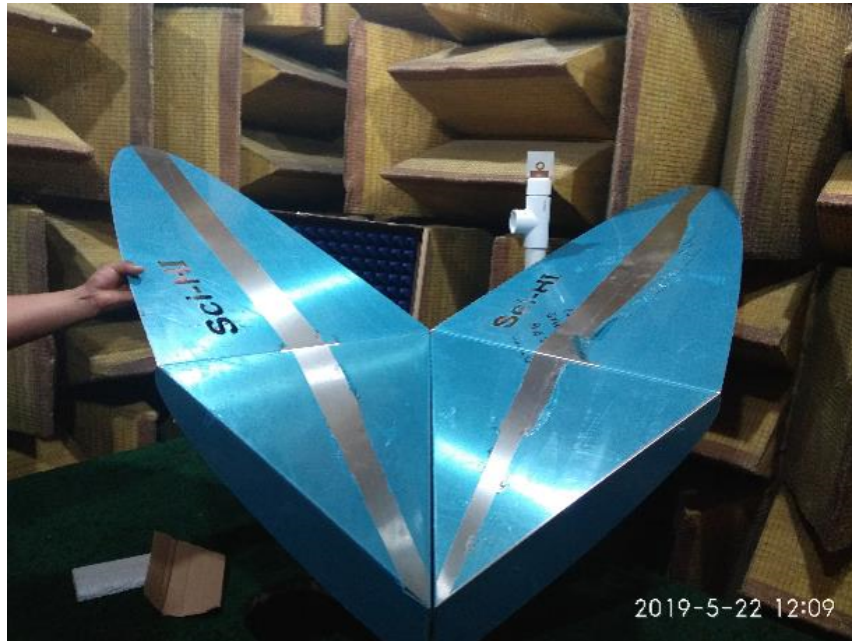


Figura 4.17: Dos elementos radiantes de la antena a tamaño real (70 MHz).

encuentra la frecuencia de 1575.42 MHz que corresponde a una de las frecuencias del sistema *Global Positioning System* (GPS por sus siglas en inglés) .

Los elementos radiantes de la antena a escala tienen la misma forma que la de tamaño real. Para la construcción de esta antena se tomaron los siguientes parámetros de diseño: $d_1 = 20\text{mm}$, $\alpha = 85^\circ$ y $h_1 = 750\text{mm}$ de la antena a tamaño real, a partir de esto se redimensiona tanto la antena como los parámetros, dividiendo cada uno por 24 a excepción del ángulo ya que este se mantiene. Las dimensiones de la antena construida son las siguientes:

- $l_1 = 5 \text{ mm}$
- $l_2 = 19.8 \text{ mm}$
- base de triángulo = 25 mm
- $l_3 = 32.2 \text{ mm}$
- $d_1 = 0.8 \text{ mm}$
- $\alpha = 85^\circ$
- $h = 31.25 \text{ mm}$

Se usa una impresora 3D para la construcción tanto del soporte de los elementos radiantes como de la base, el material de impresión es ácido poliláctico (PLA). Se usa *copper tape* para



(a) Antena ensamblada (50 MHz)

(b) Conexión de antena y analizador vectorial de redes.

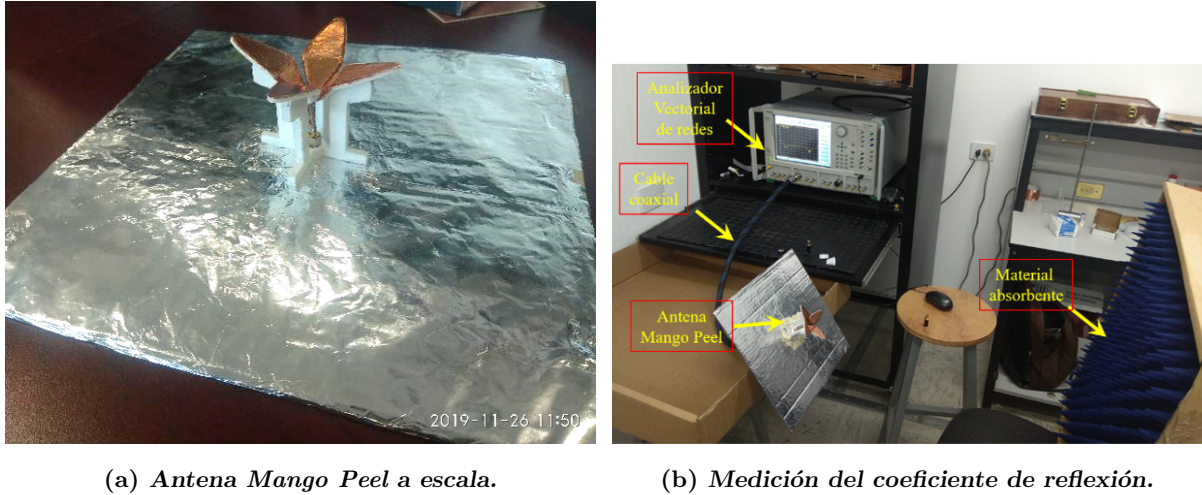
Figura 4.18: Medición de coeficiente de reflexión de antena completa.

formar la superficie radiante, el cual se adhiere a los elementos impresos. Para el plano reflector se emplea papel aluminio de 30x30 cm. En cuanto al conector, se hace uso de un conector de 50 Ω y un cable coaxial con una resistencia de 50 Ω . Al ser un cable coaxial y por conectarse únicamente dos elementos, se conecta el conductor interno a un elemento radiante y el conductor externo se conecta al elemento opuesto. Los elementos restantes no se conectan.

Las mediciones tanto del patrón de radiación como del coeficiente de reflexión se realizan haciendo uso del equipo del Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Se usa el analizador vectorial de redes (VNA) VectorStar Anritsu modelo MS4644B [39] para medir el coeficiente de reflexión, para medir el patrón de radiación se usa el generador de señales Anritsu MG3690C [40] y el analizador de señales Anritsu MS2830A [41]; el patrón de radiación se mide en la cámara anecoica que se encuentra en el mismo laboratorio.

En la figura 4.19(a) se muestra la antena impresa con la base, elementos radiantes y el plano reflector, en la figura 4.19(b) se muestra la forma en que se midió el coeficiente de reflexión, el equipo y los elementos que se usan para ello. Al realizar la medición dentro de una Jaula de Faraday se coloca material absorbente de radiación para tener lecturas más confiables.

El coeficiente de reflexión simulado para esta antena va desde 1.4 GHz hasta 3.5 GHz, por otro lado el coeficiente de reflexión medido tiene un ancho de banda que va desde 1.3 GHz hasta 3.6 GHz. Con esta antena se consigue un ancho de banda de 2 : 1, es decir, la frecuencia superior es el doble de la inferior. Este ancho de banda se debe a la altura con respecto al plano reflector. La respuesta se muestra en la figura 4.20.

(a) *Antena Mango Peel a escala.*(b) *Medición del coeficiente de reflexión.**Figura 4.19: Antena completa durante medición de coeficiente de reflexión.*

Con respecto a la forma de medir el patrón de radiación, se realiza en la cámara anecóica del laboratorio. Se usa un generador de señales el cual se conecta a una antena de prueba que tiene la función de emisora; por otra parte la antena *Mango Peel* a escala se conecta al analizador de señales, su función es la de receptora, en el analizador es donde se leen los valores de potencia recibido por la antena. La antena *Mango Peel* se gira sobre su eje para tomar medidas en los 360° , esto se realiza para cada una de las cuatro frecuencias de prueba. La forma de medir, la disposición de los equipos y antenas se muestra en la figura 4.21.

En la figura 4.22(a) se muestra el patrón de radiación obtenido mediante simulación y en la figura 4.22(b) se tiene el patrón de radiación medido. Se observa similitud en la forma del patrón de radiación de las frecuencias donde se tomaron las mediciones. Se tomaron 4 frecuencias, $f = 1.5 \text{ GHz}$, 2 GHz , 2.5 GHz y 3.0 GHz para ambos casos, tanto simulado como medido. Las mediciones se tomaron con intervalos de 5° para dar un total de 72 mediciones por frecuencia. Debido al número de muestras que se toman, el patrón de radiación simulado tiene mayor definición que el medido. Tomar mediciones con mayor resolución se vuelve complejo al realizar de forma manual la rotación y posicionamiento de la antena.

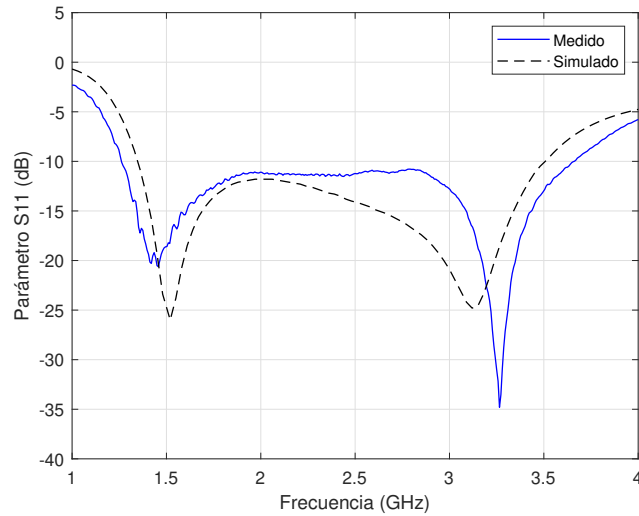


Figura 4.20: Coeficiente de reflexión de antena a escala.

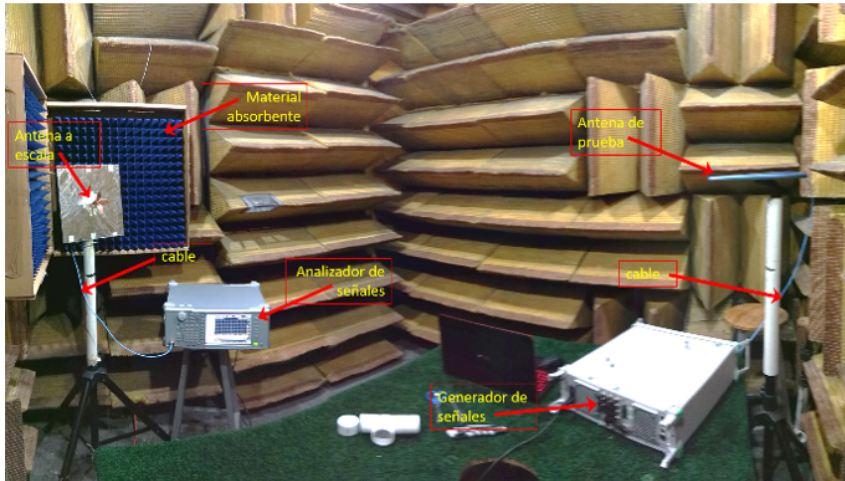


Figura 4.21: Medición del patrón de radiación.

4.4. Conclusiones

La antena *Mango Peel* tiene ventajas por su versatilidad. Se tiene la opción de formar un dipolo o un dipolo cruzado con la opción de obtener polarizaciones lineal, elíptica o circular. Al estar formada por partes móviles se obtienen diferentes respuestas sin necesidad de cambiar el tamaño o la forma de los elementos radiantes de la antena, basta con mover los elementos en alguno de los tres grados de libertad que presenta la antena. El uso de un plano reflector hace que el patrón de radiación sea direccional.

El uso de software de onda completa como lo es FEKO proporciona un panorama de la respuesta que se espera obtener de la antena. Una vez obtenida una respuesta satisfactoria mediante simulación, es preciso verificar el comportamiento de la antena, es entonces que se construye la

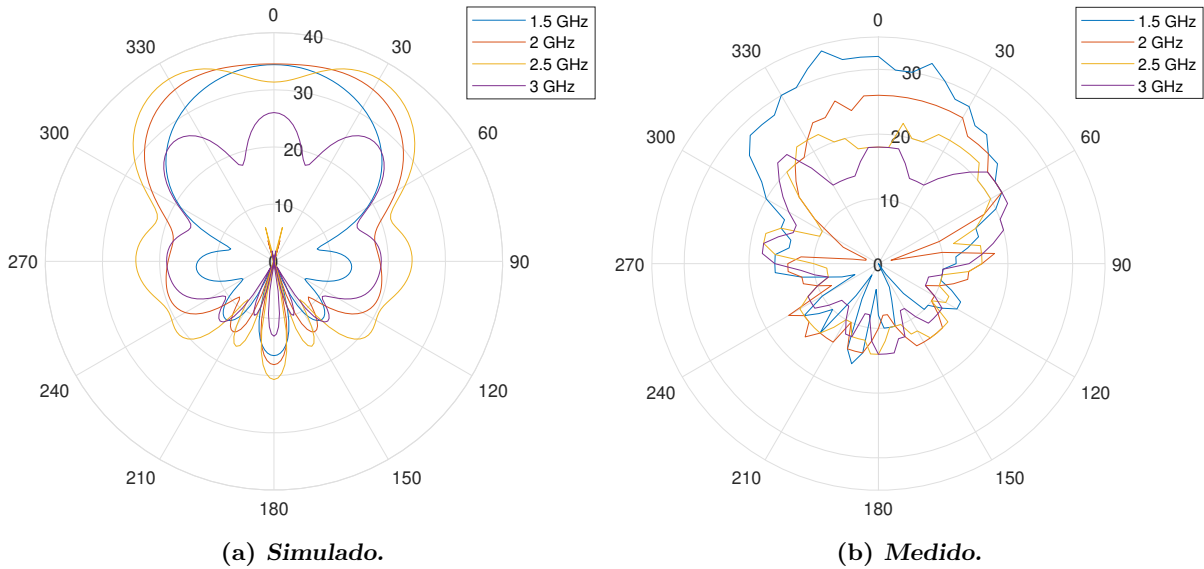


Figura 4.22: Patrón de radiación de antena a escala.

antena y se realiza la verificación de lo simulado. El tamaño de la antena está en función de la aplicación y del rango de frecuencia sobre el que se quiera trabajar.

Gracias a la versatilidad de la antena, es posible redimensionarla para trabajar en otros rangos de frecuencias. Sin embargo, al aumentar la frecuencia, el proceso de construcción tiende a ser más complicado debido a las pequeñas dimensiones que se manejan, haciendo necesario el uso de técnicas de construcción más sofisticadas.

Se logra obtener una configuración específica con respecto a la posición de los elementos para lograr una respuesta deseable de la antena. Se construyó una antena a escala con una configuración específica en la que se priorizó el ancho de banda, se midieron el patrón de radiación y coeficiente de reflexión, obteniendo resultados semejantes a los simulados.

Capítulo 5

Tarjeta ROACH2

La Radioastronomía es el estudio de las emisiones naturales de radio de fuentes celestiales, es decir, estudia el Universo a través de las ondas de radio que son emitidas por los diferentes cuerpos celestes. Para captar estas emisiones de radio, la radioastronomía hace uso de telescopios, generalmente son antenas parabólicas. Con estas antenas se hace posible observar o detectar nueva información acerca de objetos celestiales, la cual no es detectable por los telescopios ópticos. Además de las antenas o radiotelescopios y de la etapa de acondicionamiento de señal se necesita de dispositivos que adquieran la señal y la procesen. Existen sistemas basados en computadoras personales y algunos más basados en sistemas dedicados a la tarea de procesar dichas señales, tal es el caso de los sistemas basados en tecnología FPGA.

El grupo Center for Astronomy Signal Processing and Electronics Research (CASPER, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Berkeley desarrolla *hardware*, *software* y herramientas de programación dedicado al procesamiento de señales astronómicas [42]. El *hardware* desarrollado por CASPER está basado en tecnología FPGA, los sistemas desarrollados hasta la actualidad son: *iBOB*, *BEE2*, *ROACH*, *ROACH 2*, *SNAP*, *SNAP2*, *SKARAB* y *Red Pitaya*, algunos de estos ya han sido descontinuados. El experimento SCI-HI tiene como etapa de procesamiento la tarjeta *ROACH 2*.

La tarjeta FPGA *ROACH 2* es una placa de procesamiento independiente y a su vez es la segunda versión y sucesora de la *ROACH* original. *ROACH* es el acrónimo para *Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware*, es decir, es un hardware para cómputo, de arquitectura abierta y reconfigurable, es reconfigurable debido a la característica de las FPGA [43], ya que está basada en esta tecnología. En la figura 5.1 se muestran los componentes internos de la tarjeta *ROACH 2*.

Las características principales de diseño de la *ROACH 2* incluyen:

- FPGA Virtex-6 SX475T (476,160 elementos lógicos).

- Procesador Power PC 440EPx independiente que provee las funciones de control.
- 2 tarjetas ADC ADC2x400-14.



Figura 5.1: Vista superior tarjeta ROACH2 [43].

Al igual que las demás tarjetas desarrolladas por CASPER, *ROACH 2* no se programa usando lenguaje *Hardware Description Language* de forma directa. Se usa un conjunto de bloques de Matlab/Simulink, estos bloques son desarrollados por CASPER y otros por Xilinx, para lo cual se requiere de una computadora con ambientación específica.

5.1. Ambientación de computadora

Para programar y posteriormente usar la tarjeta *ROACH 2* se necesita ambientar una computadora mediante la cual se permita tanto la generación de los archivos necesarios para programar la tarjeta así como la comunicación con la misma para la adquisición de datos que procese la tarjeta. Los desarrolladores de esta tarjeta recomiendan el uso de software específico para el trabajo con la misma, el *software* se divide en dos partes, la primera denominada *CASPER Toolflow* el cual reúne el software para generar y compilar los archivos para programarla y la segunda parte se refiere a las herramientas de comunicación y control cuando ya ha sido programada.

En el caso de *ROACH 2* se tiene como requisitos el uso de la distribución Linux Ubuntu 14.04 o Ubuntu 16.04, en el caso de la presente tesis se hará uso de Ubuntu 14.04, se recomienda

también el uso de Matlab en su versión 2013b y la versión 14.7 de Xilinx ISE, así como la librería de CASPER llamada *mlib_devel* [44].

Existen situaciones en las que no es factible la instalación del sistema operativo directamente en disco duro por lo que se emplea una máquina virtual para ejecutar Ubuntu. Para el desarrollo de este trabajo de tesis se hace uso del software VMware que permite ejecutar máquinas virtuales, de forma que la versión de Ubuntu instalada es la 14.04 para evitar problemas de compatibilidad de *hardware*.

En la figura 5.2 se muestra el diagrama a bloques de la ambientación de la computadora que se emplea para trabajar con la tarjeta, es necesario mencionar que este proceso se encuentra en [45] además de realizar algunas adecuaciones ya que por lo general si se siguen las instrucciones como se describen se generan errores, la ayuda para resolver problemas se puede conseguir en [46]. Crear el ambiente desde donde se programe la *ROACH 2* se realiza desde la línea de comandos de la terminal de Linux.

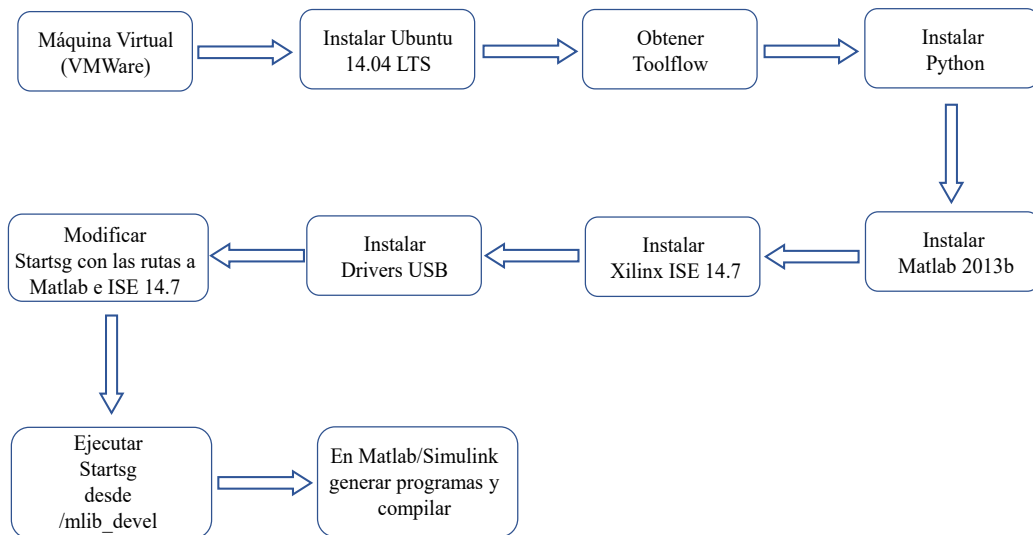


Figura 5.2: Diagrama a bloques de ambientación de una computadora para trabajar con *ROACH 2*.

Además del *software* como MATLAB/Simulink y Xilinx ISE, se instalan librerías de Python 2.7 mediante las cuales se realiza la conexión y control con *ROACH 2*. Dentro de las librerías de Python necesarias para la correcta comunicación con *ROACH 2* se encuentran:

- Numpy
- Katcp
- Casperfpga
- Corr

Después de la ambientación de la computadora y la instalación de las librerías de Python, el siguiente paso es la creación en Matlab/Simulink del modelo del programa o aplicación que ha de implementarse en *ROACH 2*, una vez creado el modelo se compila en Matlab desde la línea de comandos y este a su vez genera el archivo *.bof* que se transfiere y programa en *ROACH 2*.

El grupo CASPER pone a disposición cuatro ejemplos los que se toman como base para empezar a diseñar otros proyectos, estos ejemplos son: Introducción a Simulink, Interface 10GBe, Espectrómetro de banda ancha y Correlador de banda ancha, estos ejemplos se describen a continuación.

5.2. Ejemplos para uso de la tarjeta

En el proceso de diseño del *software* en Simulink se manejan tres tipos de bloques los cuales se pueden identificar por colores:

- Bloques amarillos. Corresponden a la Librería CASPER XPS y contienen interfaces con el *hardware* como los son: ADC, chips de memoria, CPUs, puertos de Ethernet, entre otros.
- Bloques verdes. Corresponden a la librería CASPER DSP y en él se encuentran bloques que implementan funciones de DSP, algunos ejemplos de estos bloques son: filtros, FFTs, entre otros.
- Bloques azules. Corresponden a la librería de Xilinx, entre estos se encuentran funcionalidades como multiplexores, retardos, sumas, entre otros más. Una parte importante de esta librería es que también contiene el bloque *System Generator*, este bloque contiene información acerca del tipo de tarjeta con la que se esté trabajando

5.2.1. Introducción a Simulink

En este primer tutorial se crea un diseño en Simulink en el cual se emplean algunos bloques de Xilinx así como los creados específicamente por CASPER, se muestra cómo generar un archivo FPGA o *.bof*, el cómo programar la tarjeta *ROACH 2* e interactuar con la misma. Se dan algunos consejos acerca de los nombres de los archivos para evitar problemas.

En este primer ejemplo se trabaja el parpadeo de un LED que se encuentra en la parte frontal del chasis que contiene la tarjeta, se construye un contador el cual se puede iniciar, detener o resetear desde el software y un sumador de dos números, ver figura 5.3 [47].

Todos los modelos que se generan en Simulink deben contener los bloques *System Generator* y en el caso de *ROACH 2* el bloque de configuración es *XSG core config*.

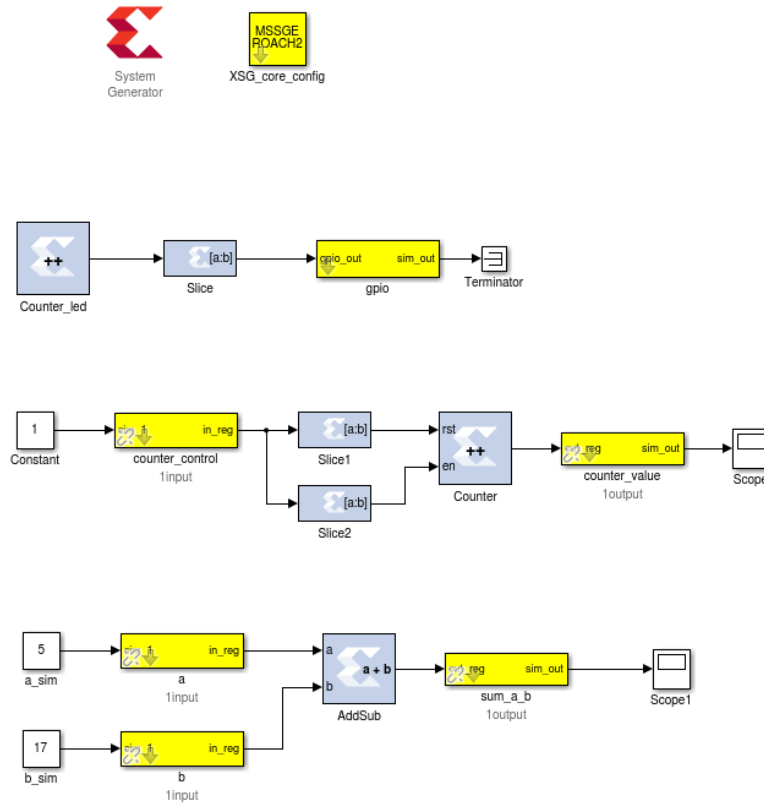


Figura 5.3: Diagrama a bloques en Simulink del primer tutorial [47].

5.2.2. Interface de 10GbE

En este ejemplo se crea un diseño en Simulink que permite conectar la tarjeta *ROACH 2* con otros dispositivos mediante el puerto 10GbE. En este tutorial uno de los principales bloques a usar es el llamado *ten_GbE* el cual corresponde al conjunto de los bloques amarillos, se emplean de la misma forma registros para proveer la dirección IP y el número de puerto usado para la comunicación. El desarrollo de aplicación se puede encontrar en [48] y el resultado final del proyecto en Simulink se presenta en la figura 5.4.

Para programar e interactuar con la tarjeta *ROACH 2* se hace uso de un script de *python* el cual programa la FPGA con el diseño creado mediante el archivo *.bof* que se genera durante la compilación. Este archivo configura los puertos 10GbE e inicia la transferencia de datos. Para usar este script se teclea en la interface de python la siguiente línea `./roach2_tut_tge.py <ROACH_IP_ADRESS>`

5.2.3. Espectrómetro de banda ancha

Un espectrómetro es un dispositivo que transforma una señal en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. En los sistemas digitales se emplea la Transformada Rápida de Fourier

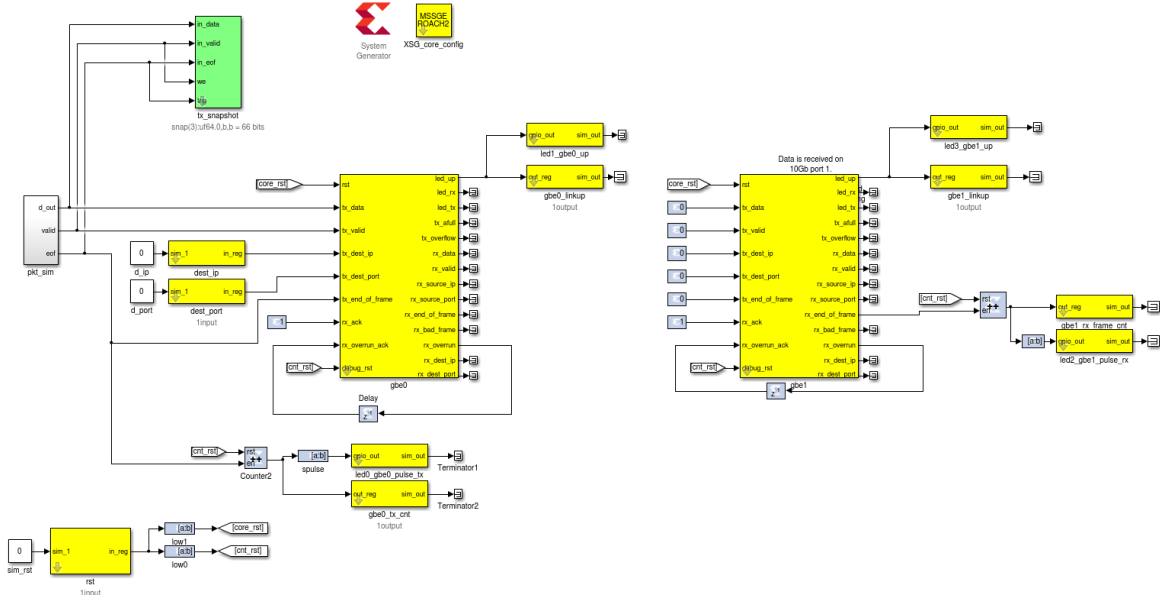


Figura 5.4: Diagrama a bloques del tutorial número 2 [48].

(FFT) para realizar dicha tarea, además de un banco de filtros polifásicos (PFB) para mejorar su desempeño. Cuando se emplea un espectrómetro para aplicaciones astronómicas se debe tener en cuenta la naturaleza del fenómeno a observar.

Algunos parámetros a tomar en cuenta para el diseño del espectrómetro son el ancho de banda ($Bw = 1/(2 * periodo\ muestreo)$), la resolución de frecuencia ($\Delta f = BW/numero\ de\ canales$) y la resolución de tiempo, el desarrollo de este tutorial se encuentra en [49]. Es de suma importancia tomar en cuenta la frecuencia que se quiere procesar ya que se hace uso de un convertidor analógico digital (ADC). Se emplea de la misma forma un script escrito en Python para la comunicación y configuración de la visualización del espectro. En la figura ?? se muestra el proyecto en bloques de Simulink.

5

5.2.4. Correlador de banda ancha

Para este tutorial se emplea la tarjeta ADC en la adquisición de la señal que se procesará, además del bloque CASPER DSP el cual está destinado a procesar la señal en un ancho de banda de 400 MHz. Para obtener una imagen con mayor resolución del cielo o un objeto se emplean arreglos de radio telescopios en fase y de un proceso llamado correlación. Generalmente se usan antenas con polarización doble, horizontal y vertical, cada polarización alimenta a entradas diferentes del ADC.

El procedimiento que se sigue para la creación de este proyecto se encuentra en [50], en este mismo enlace se encuentran las especificaciones con respecto al tipo de datos y bloques

empleados, una parte importante de este y el anterior tutorial es que la FPGA trabajará a la misma señal de reloj que lo hace el ADC ya que de este es de donde se toma la señal de reloj, en la figura 5.5 se muestra el diseño en Simulink para el correlador.

5.3. Compilación y conexión ROACH2-Computadora

Una vez culminado cualquier ejemplo o proyecto en Simulink, se realiza la simulación en la misma ventana donde se genera el modelo, si no hay errores en Simulink al simular, el siguiente paso es ejecutar en la línea de comando de Matlab el comando *casper_xps*, este comando varía para cada versión de tarjeta con la que se trabaje. A partir de esto se lanza una ventana llamada *System Generator*, ver figura 5.6, y se da click en el botón *Run XPS*, de esta forma se inicia el proceso de compilación, si no hay errores en el archivo y después de un tiempo considerable, regresa a la consola de Matlab con información acerca del proceso de compilación. Este proceso genera el archivo de salida (*.bof*) el cual se usa para programar el FPGA y se encuentra en el directorio */bit_files*.

Para programar la ROACH 2 se requiere la librería de *Python* llamada *casperfpga* [51], desarrollada por el grupo SA-SKA. Se debe conocer la dirección IP de la tarjeta o asignarle una fija mediante MINICOM. En la terminal se teclea *ipython* y abre una interface de python en la que se teclea la instrucción *import corr*, enseguida se genera una variable a la que se denomina *fpga* y se le asigna la dirección IP de la *ROACH 2*, a continuación se programa la FPGA mediante el comando *fpga.nombre_de_archivo.bof*, cuando se ejecuta este comando y devuelve un valor *true* se puede asumir que no hubo errores y que la FPGA ha sido programada.

5.4. Conclusiones

El uso de dispositivos reconfigurables basados en FPGA, como la tarjeta *ROACH 2*, permite tener equipos dedicados exclusivamente al procesamiento de señales. La característica de ser reconfigurables da la posibilidad de implementar diferentes *firmware* con diferente propósito. La programación de esta tarjeta y de las demás desarrolladas por el grupo CASPER se realiza mediante un conjunto de *software* específico. El conocimiento y uso del lenguaje de programación Python así como de librerías desarrolladas abre la posibilidad de desarrollar interfaces que permiten la comunicación y control de la tarjeta *ROACH 2*. Los bloques de Simulink y ejemplos que proporciona CASPER son de gran utilidad ya que basados en el funcionamiento y estructura de los mismos se da lugar al desarrollo de nuevos modelos o mejoramiento de los presentados. La parte de procesamiento de señal del presente trabajo se basa en el tutorial llamado Espectrómetro de banda ancha.

Se ambientó una computadora con el *software* requerido para trabajar con la tarjeta *ROACH 2*. La ambientación se realizó usando una máquina virtual. Los cuatro tutoriales se llevaron a cabo en Simulink, se compilaron sin presentar problemas. El primer tutorial se programó en la tarjeta con lo que se verificó tanto la correcta ambientación de la computadora como la comunicación entre ambos dispositivos.

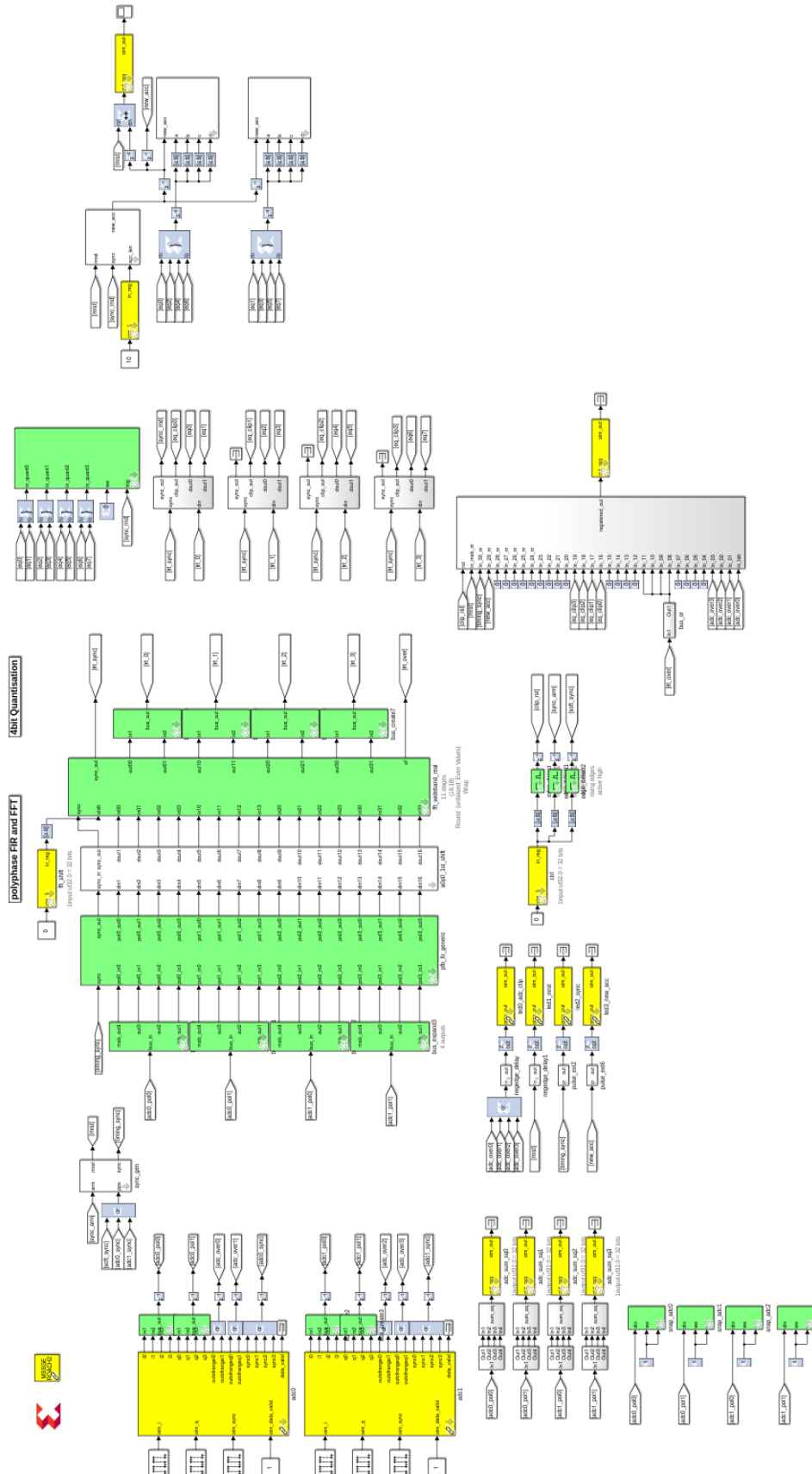
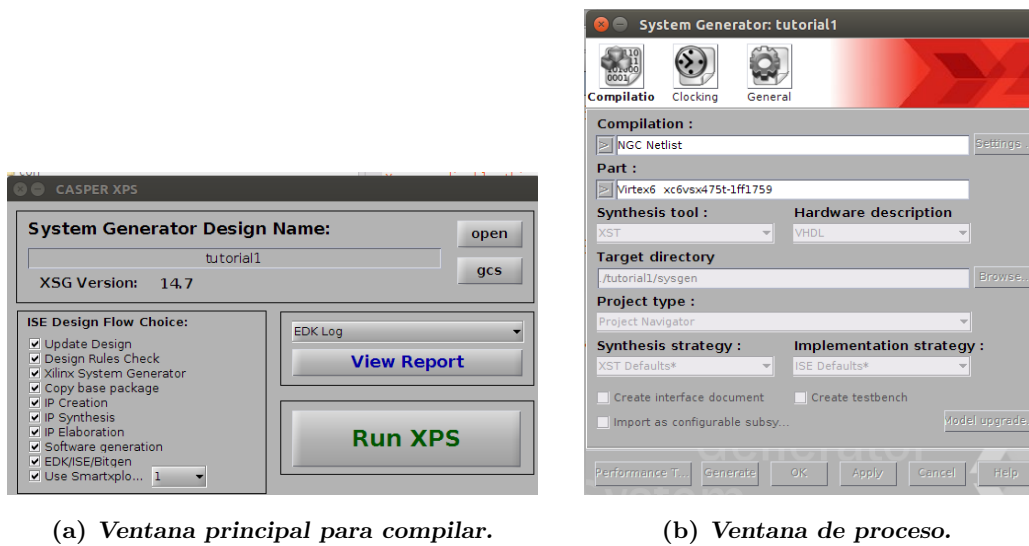


Figura 5.5: Diagrama a bloques en Simulink del correlador [50].



(a) Ventana principal para compilar.

(b) Ventana de proceso.

Figura 5.6: Ventanas para el proceso de compilación y generación de archivos.

Capítulo 6

Pruebas experimentales

A partir de lo desarrollado en los capítulos anteriores, se propone el sistema que se muestra en la figura 6.1. En este diagrama se incluye la antena *Mango Peel* como dispositivo receptor, la primera etapa de acondicionamiento de señal el cual incluye el *switch* mecánico con los terminales de calibración y una primera etapa de amplificación; la primera y segunda etapa son conectadas a través de cable coaxial tanto para transmitir la señal como para la alimentación de los amplificadores y el control del *switch*. La segunda etapa de acondicionamiento de señal está enseguida del cable coaxial y consta de etapa de amplificación, atenuación y filtrado. Enseguida se encuentra la etapa de procesamiento de señal que está integrada por la tarjeta *ROACH 2* así como por el ADC incluido en ella. Para la visualización y almacenamiento de datos se dispone de una computadora Raspberry Pi, esta computadora también controla las conmutaciones del *switch*.

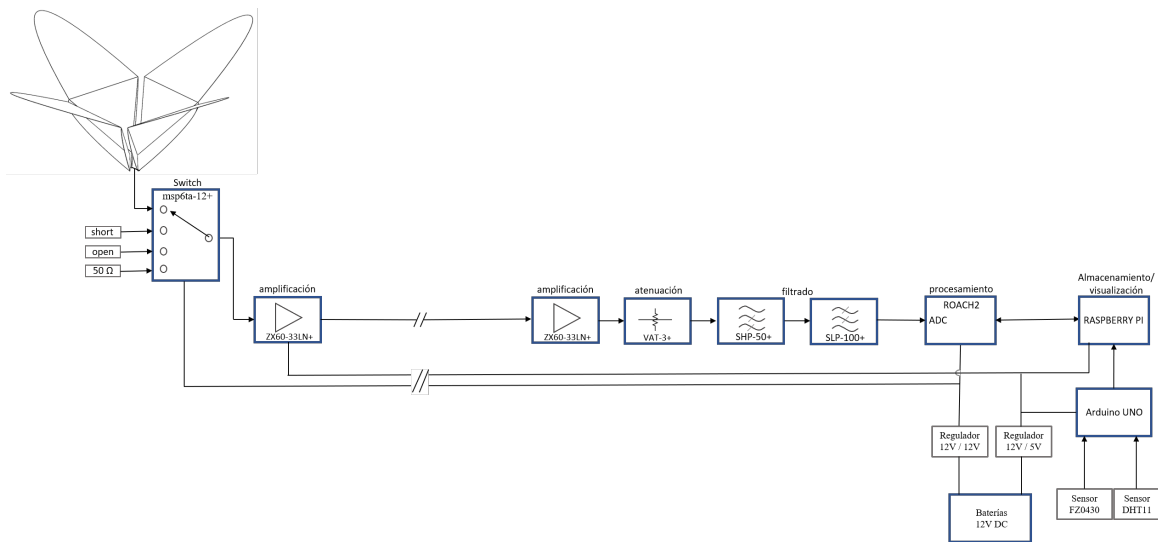


Figura 6.1: Diagrama del sistema a emplear.

El monitoreo de variables como la temperatura del ambiente y voltaje de las baterías se

realiza con una placa Arduino UNO ya que dispone de seis canales analógicos, además de tener otros protocolos de comunicación que permiten la conexión de otros sensores [52]. Se usan los sensores FZ0430 y DHT11 para monitorear el voltaje de baterías y temperatura del ambiente respectivamente [54] [53]. En la figura 6.2 se muestra el circuito de adquisición de estas variables.

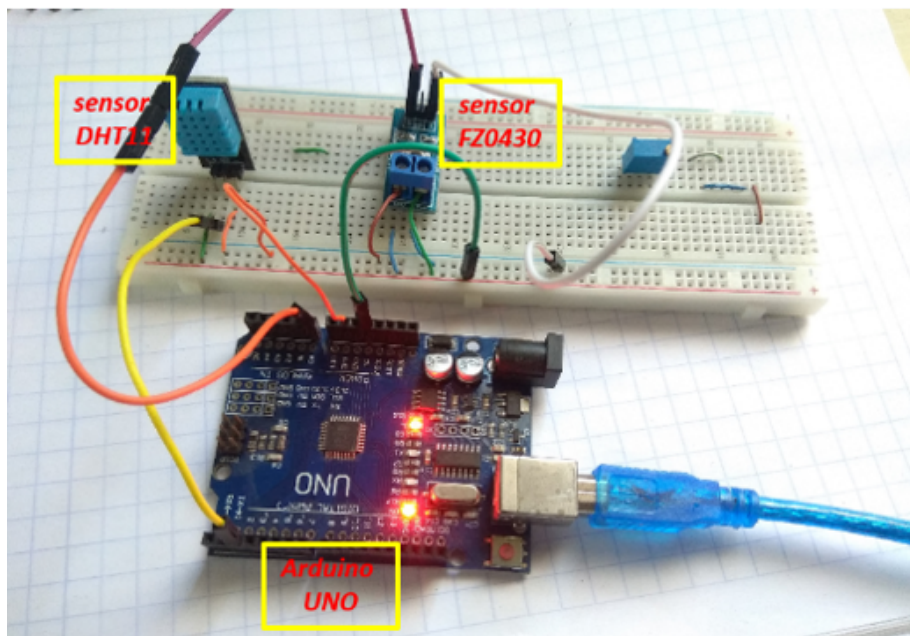


Figura 6.2: Placa Arduino UNO con sensores DHT11 y FZ0430.

Por otra parte se tiene una interfaz gráfica de usuario creada en Python con la cual se leen de forma numérica y gráfica las variables de temperatura, humedad y voltaje. Esta interfaz al ser desarrollada en Python tiene la facilidad de ejecutarse tanto en Raspberry Pi como en una computadora ambientada con Ubuntu. En la figura 6.3 se muestra el inicio de la interfaz.

En las figuras 6.4 y 6.5 se muestra la interfaz al adquirir datos desde arduino y posteriormente la gráfica de cada una de las variables leídas. Los datos obtenidos son guardados en un archivo de texto, con lo que es posible procesarlos y analizarlos posteriormente.

En la figura 6.6 se muestra el espectro en el ancho de banda de 50 MHz a 100 MHz que corresponde al rango de frecuencias en el que el experimento SCI-HI busca la señal de Hidrógeno Neutro. Esta gráfica es obtenida al conectar los dispositivos de acondicionamiento de señal y usando la tarjeta *ROACH 2*, así como la interfaz creada para la visualización de la señal [tesis Javier].



Figura 6.3: Interfaz gráfica escrita en Python.

6.1. Conclusiones

La integración de elementos tanto de *hardware*, *software* y *firmware* en un sistema proporciona muchas ventajas. El uso de *software* es de gran importancia en la generación del *firmware* para la tarjeta FPGA así como para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario y todo lo que esta involucra. El *firmware* que se graba en la *ROACH 2* da la facilidad de tener un sistema dedicado exclusivamente al procesamiento de la señal adquirida por el ADC. Por último, el uso de *hardware* y dispositivos de acondicionamiento de señal protegen al sistema de procesamiento, además de entregar una señal con valores de tensión que son soportados por este.

En este capítulo se propone un sistema completo que incluye una antena tipo Mango Peel que trabaja en un rango de frecuencia de 70 MHz a 120 MHz, así como dos etapas de acondicionamiento de señal separadas y conectadas por cable coaxial. La etapa de procesamiento se basa en una tarjeta *ROACH 2* y una computadora Raspberry Pi para el control del *switch* y monitoreo de variables. Se presenta una interfaz gráfica de usuario mediante la cual se visualiza la lectura de las variables de temperatura del ambiente y voltaje de baterías. Estas variables son adquiridas mediante la tarjeta de desarrollo Arduino UNO.

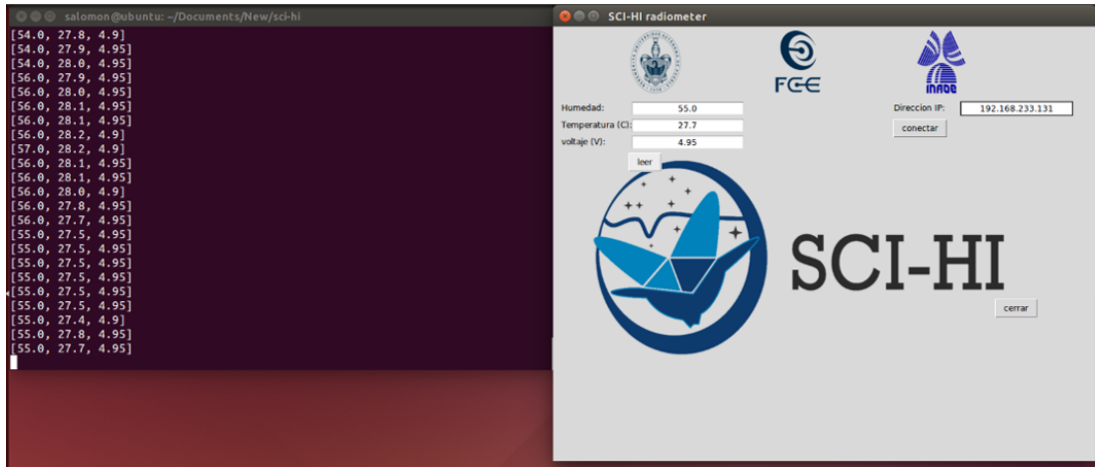


Figura 6.4: Lectura de variables de forma numérica.

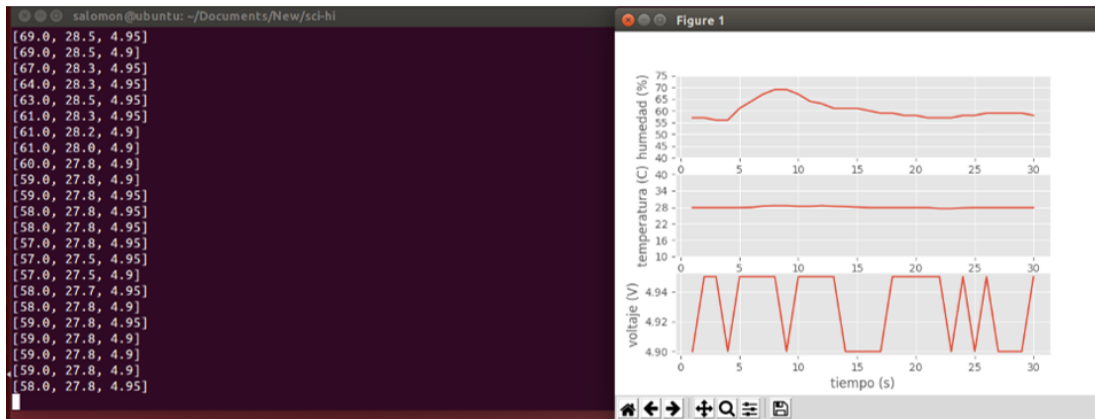


Figura 6.5: Representación gráfica de las variables: humedad, temperatura y voltaje.

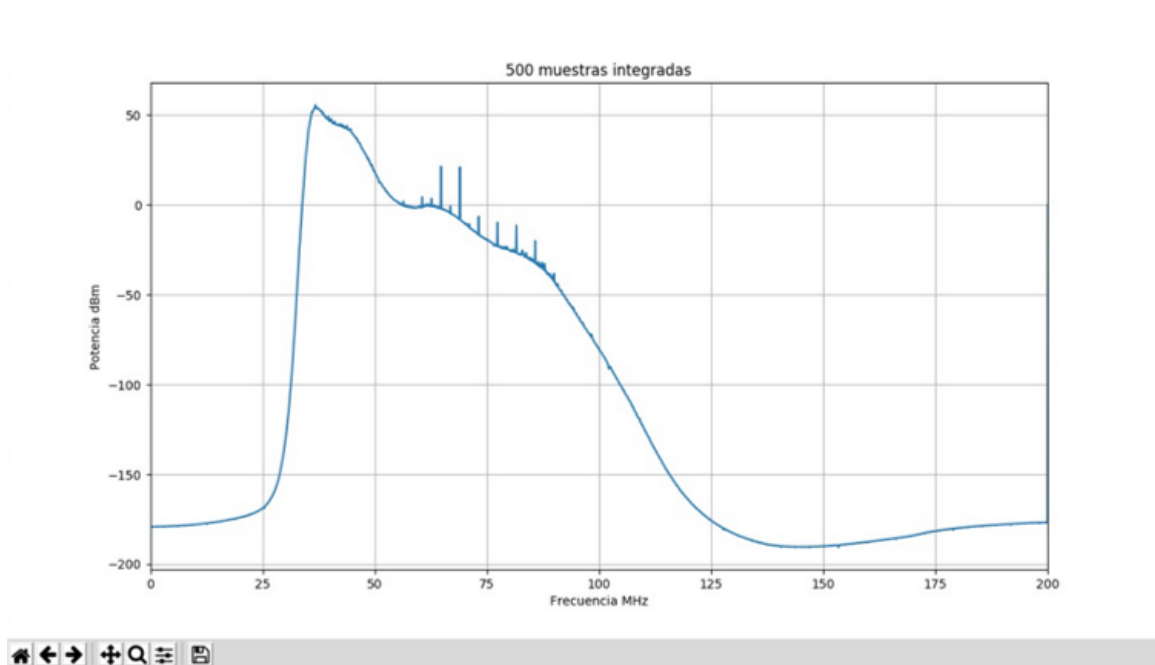


Figura 6.6: Espectro del ancho de banda del experimento SCI-HI [Ulloa Velázquez Javier. SCI-HI: Integración de un interferómetro de dos antenas. 2020. Tesis en proceso].

Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de este trabajo de tesis se abordaron diferentes temas que van desde la teoría del Marco Cosmológico, lo referente a la teoría de antenas así como lo relacionado con los radiómetros. Enseguida se abordó el proceso de diseño y simulación de la antena *Mango Peel*, a continuación se trató el desarrollo de la ambientación para el trabajo con la tarjeta *ROACH 2* y finalmente se presentó una propuesta del sistema para el proyecto SCI-HI.

6.2. Conclusiones

El estudio del Marco Cosmológico relacionado con la línea de los 21 cm de Hidrógeno Neutro, así como el de la teoría de antenas y sus parámetros sentaron las bases para comprender el contexto en el que se desarrolla el experimento SCI-HI. Los conceptos del radiómetro permitieron comprender la estructura y dispositivos que lo conforman, se seleccionan los dispositivos electrónicos de acondicionamiento de señal de acuerdo al rango de frecuencias en el que trabaja SCI-HI. El uso de una computadora Raspberry Pi es de gran utilidad ya que dispone de terminales GPIO desde los cuales se controla la conmutación del *switch* mecánico.

Estudiar los antecedentes de la antena *Mango Peel* permitió seguir su desarrollo, desde la antena de cuatro cuadros, pasando por *Hibiscus* hasta llegar al modelo actual. Usando *software* de diseño y simulación de antenas se logró obtener una configuración de la antena que consigue un coeficiente de reflexión por debajo de -10 dB en un ancho de banda de 70 a 110 MHz con variación de 1 dB. Con respecto al patrón de radiación, se obtiene un diagrama uniforme en este rango, con HPBW de 60.5° para la frecuencia inferior y de 70.5° para la superior.

Se redimensionó, simuló y construyó una antena Mango Peel a escala 24 : 1, se midió el patrón de radiación a diferentes frecuencias así como el coeficiente de reflexión. Los datos simulados y medidos son consistentes.

Con la ambientación de una computadora desde la que se programa la tarjeta *ROACH 2* se simularon y compilaron los ejemplos que proporciona CASPER, aunado a esto se programó con éxito el primer tutorial, con lo que se verifica la correcta ambientación y funcionamiento de la

tarjeta, así como la comunicación entre los dos equipos.

A partir de lo estudiado y desarrollado a lo largo del trabajo de tesis se propone un sistema para el experimento SCI-HI. El sistema incluye a la antena *Mango Peel*, dispositivos de acondicionamiento de señal y la tarjeta *ROACH 2* para la etapa de procesamiento. Se presentó la primera versión de una interfaz gráfica para la visualización y almacenamiento de datos.

6.3. Trabajo futuro

Cualquier sistema es perfectible, de lo contrario no habría avance en la ciencia y tecnología. Basándose en esta premisa, este trabajo de tesis también es perfectible. Como trabajo futuro se propone la conexión de los cuatro elementos radiantes para formar un dipolo cruzado y generar diferentes polarizaciones, además de construir una antena *Mango Peel* a otra frecuencia (900 MHz) para comprobar el patrón de radiación y coeficiente de reflexión. Seguir desarrollando la interfaz en Python. Integrar todo el sistema para realizar observaciones en la búsqueda de la línea de los 21 cm de Hidrógeno Neutro de los primeros objetos luminosos.

Bibliografía

- [1] Pritchard J. R., Loeb A., 21-cm cosmology in the 21st Century, [arXiv:1109.6012v2], 2012.
- [2] Trombetti T., Burigana C., Perspectives for Cosmological Reionization From Future CMB and Radio Projects, *Front. Astron. Space Sci.* 5, 33, 2018.
- [3] *Microwave Antenna Theory and Design*, by Samuel Silver, M.I.T. Radiation Laboratory Series, 1984.
- [4] Huges S. W., Cowley., Teaching the Doppler Effect in Astrophysics, [arXiv:1701.04478v1], 2017.
- [5] Hogg D. W., Distance measures in cosmology, [arXiv:astro-ph/9905116v4], 2000.
- [6] *How Did the First Stars and Galaxies Form?* By Abraham Loeb. Princeton University Press, 2010. [<http://press.princeton.edu/titles/9373.html>].
- [7] Peterson, J.B., Voytek, T.C., Natarajan, A., Jauregui-Garcia, J.M., & Lopez-Cruz, O., Measuring the 21 cm Global Brightness Temperature Spectrum During the Dark Ages with the SCI-HI Experiment, [arXiv:1409.2774], 2014.
- [8] James J. Condon & Scott M. Ransom, *Essential Radio Astronomy*, Princeton University Press, [<https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era/>], 2016.
- [9] M.P.van Haarlem, et al, LOFAR: The LOw-Frequency ARay, [arXiv:1305.3550v2], 2013.
- [10] Price D.c., et al., Design and characterization of the Large-aperture Experiment to Detect the Dark Age (LEDA) radiometer systems, [arXiv:1709.09313v3], 2019.
- [11] Colin J. Lonsdale, et al, THE Murchison Widefield Array: Design Overview, *PROCEEDINGS OF THE IEEE*. Vol. 97, No. 8, 2009.
- [12] <http://eor.berkeley.edu/> última consulta 20/noviembre/2018.
- [13] <https://www.skatelescope.org/the-ska-project/> Última fecha de consulta 20/noviembre/2018.

- [14] DeBoer D. R., et al., HYDROGEN EPOCH OF REIONIZATION ARRAY (HERA), [arXiv:1606.07473v2], 2016.
- [15] <http://loco.lab.asu.edu/edges/> última consulta 20/noviembre/2018.
- [16] S., Singh, R., Subrahmanyam, N. U., Shankar, M., Sathyanarayana Rao, B.S., Girish, A. Raghunathan, R. Somashekar., K.S. Srivani., SARAS 2: A Spectral Radiometer for probing Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization through detection of the global 21 cm signal, [arXiv:1710.01101v1], 2017.
- [17] O. Burns J., Lazio J., Bale S., Bowman J., Bradley R., Carilli C., Furlanetto S., Harker G., loeb A., Pritchard J., Probing the first stars and black holes in the early Universe with the Dark Ages Radio Explorer (DARE), <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.014> 2011.
- [18] Marcin Sokolowski, Steven E. Tremblay, Randall B. Wayth, Steven J. Tingay, Nathan Clarke, Paul Roberts, Mark Waterson, Ronald D. Ekers, Peter Hall, Morgan Lewis, Mehran Mossammaparast, Shantanu Padhi, Franz Schlagenhauser, Adrian Sutinjo, and Jonathan Tickner., BIGHORNS - Broadband Instrument for Global HydrOgen ReioNisation Signal, arXiv:1501.02922v1 [astro-ph.IM], 2015.
- [19] L. Philip, Z. Abdurashidova, H. C. Chiang, N. Ghazi, A. Gumba, H. M. Heilgendorff, J. Hickish, J. M. Jáuregui-García, K. Malepe, C. D. Nunhokee, J. Peterson, J. L. Sievers, V. Simes, and R. Spann., Probing Radio Intensity at high-Z from Marion: 2017 Instrument, arXiv:1806.09531v1 [astro-ph.IM], 2018.
- [20] Voytek, T.C., Natarajan, A., Jauregui-Garcia, J.M., Peterson, J.B., & Lopez-Cruz, O., Probing the Dark Ages at $z \sim 20$: The SCI-HI 21 cm All-sky Spectrum Experiment, *Astrophysical Journal Letters*, 782, L9, 2014.
- [21] *Antenna Theory: Analysis and Design*, by Constantine A. Balanis, John Wiley, Fourth Edition, 2016.
- [22] *Antenna Theory and Design*, 3rd Ed., by Warren L. Stutzman, and Gary A. Thiele, John Wiley, 2012.
- [23] *Microwave remote sensing. Active and pasive. Volumen I, Microwave Remote Sensing Fundamental and Radiometry*. Ulaby, Fawwaz T., Moore Richard K., Fung Adrian K. 1943.
- [24] *Microwave Radiometer Systems. Design and Analysis*. by Skou Niels, Le Vine David. Second edition. 2006.
- [25] *Microwave Engineering*, by Pozar, David M., Second Edition, 1998.
- [26] Kabel, Mustafa A., *Ultra-Low Noise Amplifier Design for Magnetic Resonance Imaging systems*, orcid.org/0000-0002-2976-4333, 2017.

- [27] <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-33LN+.pdf>. Consultado el 11 de abril de 2019.
- [28] <https://www.minicircuits.com/pdfs/SHP-50+.pdf> Consultado el 15 de mayo de 2019.
- [29] <https://www.minicircuits.com/pdfs/SLP-100+.pdf> Consultado el 15 de mayo de 2019.
- [30] <https://www.minicircuits.com/pdfs/MSP6TA-12+.pdf> Consultado el 20 de abril de 2020.
- [31] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/?resellerType=home>
- [32] <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/11551/ONSEMI/BC547.html>
- [33] Jauregui-Garcia, J. M., Peterson, J. B., Castillo-Dominguez E. & Voytek, T. C., HIBiscus, a broadband antenna with matching impedance and uniform radiation pattern, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, 2017, pp. 697-698. 2017.
- [34] Seon-Youp, S., Stutzman, W., Davis, W., Waltho, A., Skeba, K., Schiffer, J., A novel Low-Profile, Dual-polarization, Multi-band Base-station Antenna Element-The Fourpoint Antenna. 0-7803-8521-7/04/ (C) 2004 IEEE.
- [35] Nealy J. Randall, Monkevich M., Stutzman Warren L., Davis William A., Patente: Trimmed Foursquare Antenna Radiating Element, 2000.
- [36] Nealy, Randall J., Patente: Foursquare Antenna Radiating Element, 1999.
- [37] Antennas: Fundamentals, Design, Measurement, by Blake, Lamont V., Long, Maurice W., Third Edition, 2009.
- [38] <http://www.altairhyperworks.com/product/FEKO>. Consultado el 2 de mayo de 2019.
- [39] <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/11410-00611AD.pdf> Consultado el 16 de febrero de 2019.
- [40] <https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/products/mg3690c> Consultado el 16 de febrero de 2019.
- [41] <https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/products/ms2830a> consultado el 16 de febrero de 2019.
- [42] <https://casper.berkeley.edu/>
- [43] <https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ROACH2>
- [44] <https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/index.html>
- [45] <https://casper-toolflow.readthedocs.io/en/latest/>

- [46] <https://www.mail-archive.com/casper@lists.berkeley.edu/>
- [47] https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/roach/tut_intro.html
- [48] https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/roach/tut_ten_gbe.html
- [49] https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/roach/tut_spec.html
- [50] https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/roach/tut_corr.html
- [51] <https://github.com/ska-sa/casperfpga>
- [52] <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- [53] <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- [54] <https://tienda.bricogeek.com/sensores/1148-sensor-medidor-de-voltaje-hasta-25v-fz0430.html>
- [55] SCI-HI: Development, testing and characterization of a 21 cm All-Sky Spectrum Experiment. Tesis doctoral. Jáuregui- García José Miguel. 2016.
- [56] <https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/HILine.html>

Apéndice

1. Constancia de congreso



Congreso Internacional de Investigación de
Academia Journals Puebla 2020

Certificado

Otorgado a

Ing. Salomón Palillero-Pérez
Dra. Olga Félix-Beltrán
Dr. Omar López-Cruz
Dr. Richard Torrealba-Meléndez
Lic. Javier Ulloa-Velázquez
por su artículo titulado

SCI-HI: incorporación de antena Mango Peel en un radiómetro

(Artículo PP110)

El artículo fue presentado en el Congreso Internacional de Academia Journals Puebla 2020 que tuvo lugar los días 13 y 14 de agosto de 2020 y que fue organizado en colaboración con la Universidad IEU en Puebla, Pue., México.

El artículo fue publicado en el portal de Internet AcademiaJournals.com en las siguientes modalidades: (1) volúmenes con **ISSN 1946-5351** Vol. 12, No. 5, 2020 online e indexación en la base de datos *Fuente Académica Plus* de EBSCOhost y (2) libro online *ebook* con ISBN 978-1-939982-55-1, mismo que lleva por título *Investigación en la Educación Superior - Puebla 2020*.

Dr. Rafael Moras
Jefe Comité de Programa del Congreso
Editor, Academia Journals

2. Artículo

Memorias del Congreso Internacional
de Investigación Academia Journals
Puebla 2020

© Academia Journals 2020

Puebla, Puebla, México
13 y 14 de agosto de 2020

SCI-HI: INCORPORACIÓN DE ANTENA MANGO PEEL EN UN RADIÓMETRO

Ing. Salomón Palillero-Pérez¹, Dra. Olga Félix-Beltrán²,
Dr. Omar López-Cruz³, Dr. Richard Torrealba-Meléndez⁴ y Lic. Javier Ulloa-Velázquez⁵

Resumen— Se presenta la propuesta del sistema que ha de usarse en el proyecto Sonda Cosmológica de la Isla para la detección del Hidrógeno Neutro (SCI-HI). Se presenta la antena a usarse como receptor, así como simulaciones realizadas en FEKO en las que se muestran la impedancia de entrada y el patrón de radiación a diferentes frecuencias, además se propone la etapa analógica de acondicionamiento de señal y la etapa de procesamiento mediante una tarjeta *ROACH2* y una computadora tipo *Raspberry Pi*.

Palabras clave—Radiómetro, antena, hidrógeno neutro, FPGA, 21 cm.

Introducción

Para captar, acondicionar y procesar la radiación o señales provenientes de objetos o eventos estelares se requiere de sistemas especializados. Dada la naturaleza de estas señales, muchas de estas no pueden repetirse ya que algunas solo ocurren cada miles o millones de años; también son muy débiles, es decir, ocurrieron hace mucho tiempo y cuando alcanzan la Tierra su potencia es tan pequeña que fácilmente es opacada por señales más cercanas o recientes, además de que se mezclan con el ruido. Una de estas señales es la correspondiente a la de los 21 cm (1420 MHz) del hidrógeno neutro (HI) proveniente de los primeros objetos luminosos en el universo, la cual debido al efecto Doppler y el corrimiento al rojo, cuando llega a la Tierra puede observarse en frecuencias menores a 200 MHz, ver Figura 1, y con potencias muy pequeñas que se requiere de receptores o antenas capaces de detectar esa radiación, además de la electrónica asociada para poder acondicionarla y posteriormente procesarla. La señal de interés de este proyecto es la centrada en los 70 MHz y un corrimiento al rojo de $z=20$.

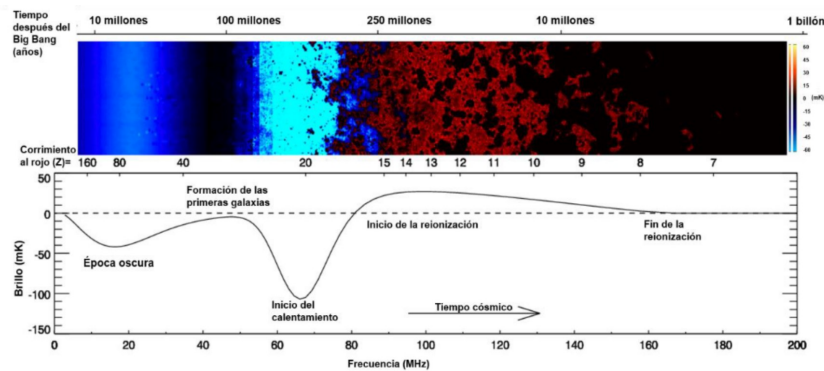


Figura 1. Relación entre el tiempo cósmico y la frecuencia en que se podría encontrar ciertos eventos, además del corrimiento al rojo correspondiente (Pritchard & Loeb, 2012).

¹ Salomón Palillero Pérez. Estudiante de Maestría en Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla.

salomon.palillero@alumno.buap.mx

² Dra. Olga Félix Beltrán. Profesora investigadora de la Facultad de Ciencias de la Electrónica en Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. olga.felix@correo.buap.mx

³ Dr. Omar López Cruz. Profesor investigador en Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Puebla, México. omarlx@inaoep.mx

⁴ Dr. Richard Torrealba Meléndez. Profesor Investigador en Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. richard.torrealba@correo.buap.mx

⁵ Lic. Javier Ulloa Velázquez. Estudiante de Maestría en Benemérita universidad Autónoma de Puebla. Puebla. ulloa.200921740@gmail.com

Alrededor del mundo se están desarrollando experimentos que buscan esta señal centrada en los 70 MHz, tal es el caso de EDGES (Bowman et al., 2007), SARAS2 (Singh et al., 2017), DARE (Burns et al., 2017), BIGHORNS (Sokolowski et al., 2015), PRIZM (Philip et al., 2018), entre otros que ocupan arreglos interferométricos. En el caso de México, se desarrolla el experimento Sonda Cosmológica de la Isla para la detección del Hidrógeno neutro (SCI-HI) (Voytek et al., 2014), sin embargo, el rango de frecuencias que se busca (40-120 MHz) coincide y se superpone con las frecuencias en las que emiten las estaciones de radio FM, es por esto que se buscan zonas radio silentes en las que la potencia de dichas señales no interfieran con las cósmicas y las señales que se capten sean las que se buscan. Una primera etapa de SCI-HI se probó en la Isla Guadalupe, que se encuentra a 240 Km aproximadamente de la costa de la península de Baja California en México, para esta etapa se empleó la antena Hibiscus (Jáuregi-García *et al.*, 2017), la cual es una antena de cuatro cuadros modificada.

Sistema de detección, acondicionamiento y procesamiento

Debido a la naturaleza de la señal que se está buscando, centrada en 70 MHz y potencia muy débil, se requiere de una antena con buena ganancia y directiva, además de tener una impedancia lo más plana posible en el rango de frecuencia de interés; así mismo se busca que los dispositivos electrónicos sean de bajo ruido y un sistema de procesamiento de señales dedicado exclusivamente a esta tarea para visualizarla o almacenarla posteriormente.

Antena Mango Peel

El diseño de la antena Mango Peel está basado en la antena Hibiscus y es una evolución de esta. La antena Mango Peel consiste en cuatro elementos, los cuales se disponen de forma diagonal para formar dos dipolos cruzados. La forma de los elementos radiantes hace que la antena sea de banda ancha, bajo cierta configuración de los elementos radiantes se alcanza un ancho de banda de 2:1. Cada uno de los elementos está formado de cuatro superficies planas; la superficie mayor es una superficie parabólica, tiene una superficie triangular que apunta hacia el centro de la antena, el plano del triángulo forma un ángulo con la superficie parabólica; en los lados restantes del triángulo hay dos superficies elípticas que forman un ángulo con la cara inferior de la superficie triangular la forma final de la antena se aprecian en la Figura 2. La forma de los elementos y su configuración ayuda a que el patrón de radiación sea direccional. Además, se emplea un plano reflector en la base de la antena, ya que se requiere que lo que capte la antena sea lo proveniente de la parte superior de la antena.

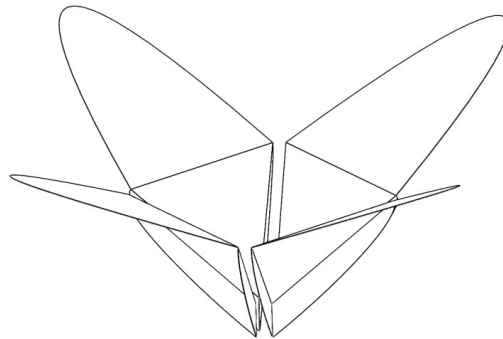


Figura 2. Diseño de la antena Mango Peel.

Se emplea el software FEKO para la simulación de los parámetros como el coeficiente de reflexión (parámetro S11), el diagrama de radiación, así como la ganancia y de esta forma obtener la mejor configuración de los elementos radiantes. Para esta antena se busca que tenga un coeficiente de reflexión lo más plano posible en el rango de frecuencia de 40 a 120 MHz, así como que su patrón de radiación sea direccional en el mismo rango de frecuencias. A través de simulaciones se consigue tener el tamaño de la antena la cual mide 2 m de extremo a extremo, aunque puede variar ligeramente dependiendo de la respuesta que se requiera. Este tamaño es adecuado para trabajar en el rango de 70 a 120 MHz. A partir de las simulaciones se consigue una respuesta por debajo de los -10 dB en el coeficiente de reflexión y variando la altura con respecto al plano reflector se consigue un patrón de radiación direccional y que varía poco en ese rango de frecuencias. Para trabajar en otros rangos de frecuencia es posible redimensionar los elementos para ajustarse a dichas frecuencias, a frecuencias más altas no se puede conseguir un coeficiente de reflexión plano,

esto se debe a que conforme las frecuencias son mayores, las ondas electromagnéticas asociadas a ellas son más energéticas, y el coeficiente de reflexión es más marcado en la frecuencia de diseño de la antena o en su primer armónico para este caso.

Para conseguir una respuesta específica de la antena se ajustan algunos parámetros físicos de la antena, esto se realiza cuando los elementos de la antena ya están construidos y se desea modificar algún parámetro como el ancho de banda o la directividad del patrón de radiación. Los parámetros que pueden modificarse son la separación entre elementos, la altura con respecto al plano reflector y el ángulo de los elementos con respecto al plano horizontal. En las Figura 3 se muestra el resultado de la simulación en la que se consigue un ancho de banda de 70 a 120 MHz por debajo de -10 dB con variaciones de 1 dB; en la Figura 4 se muestra el patrón de radiación direccional de la antena en todo el rango de frecuencias. Para verificar el patrón de radiación de la antena, se construyó un modelo a escala para frecuencias en un rango de 1.4 GHz a 3.4 GHz, el patrón de radiación medido y simulado coinciden en la forma en las frecuencias medidas (Palillero-Pérez *et al.*, en preparación), en este caso se priorizó un gran ancho de banda sobre la directividad, ver Figura 4. De acuerdo con lo obtenido en las simulaciones, el patrón de radiación tiene un *Half-power beamwidth (HPBW)* de 61° para una frecuencia de 70 MHz y de 72° para una frecuencia de 120 MHz; para frecuencias intermedias, el *HPBW* se encuentra en este rango de ángulos.

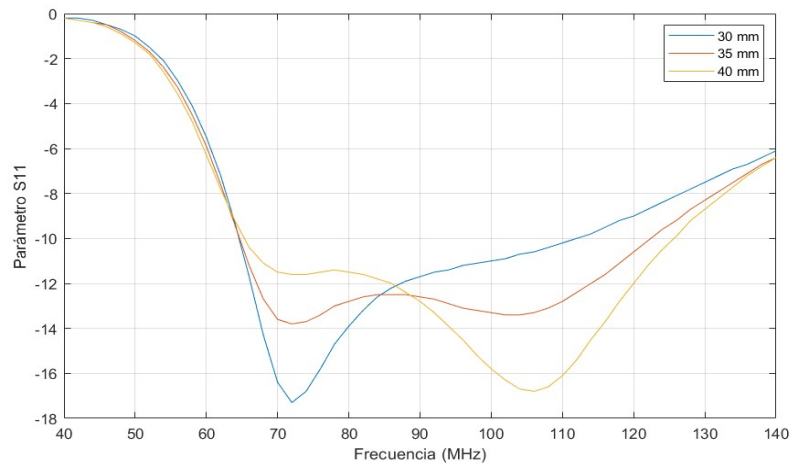


Figura 3. Coeficiente de reflexión de la antena Mango Peel con diferente separación entre elementos.

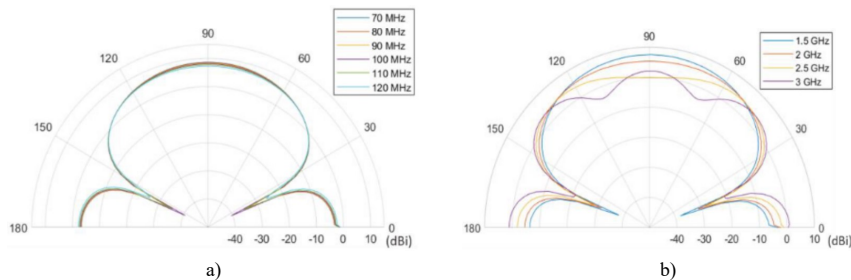


Figura 4. Patrón de radiación de la antena usando un plano reflector. a) Antena a emplear en experimento SCI-HI, b) antena a escala construida para verificar el patrón de radiación.

Acondicionamiento de la señal

La señal de interés está asociada con los primeros objetos luminosos en el universo, estrellas y galaxias, eso implica que en la actualidad se encuentra a potencias muy bajas y en frecuencias menores a 200 MHz, siendo entonces necesario el uso de dispositivos electrónicos que permitan amplificar y filtrar dicha señal para poder llevar a cabo su procesamiento. Se plantea que la parte del acondicionamiento de la señal se lleve a cabo en dos etapas, la primera etapa enseguida de la antena y la segunda antes de la entrada del convertidor analógico-digital (ADC) de la tarjeta ROACH2.

La primera etapa debe estar lo más cerca posible del conector de la antena, como una forma de reducir el ruido que pudiera generarse por los cables que conducen lo captado por la antena hasta dicha etapa. Como primer elemento se tiene un *switch* mecánico MSP6TA-12+ que se encargará de conmutar entre la señal de la antena, así como entre elementos de calibración como lo son las terminaciones de *short*, *open* y *load* (50 ohms), el siguiente elemento es una etapa de amplificación formada por amplificadores de bajo ruido (LNA), el amplificador seleccionado es el ZX60-33LN+ de Mini-Circuits que tiene un rango de trabajo de 30 a 3000 MHz y una ganancia de 21.9 dB. Debido a que la antena tiene alta sensibilidad a perturbaciones generadas por cuerpos cercanos, y para evitar introducir ruido por la segunda etapa electrónica o algún objeto cercano, se propone usar dos cables coaxiales de 50 m de largo, uno que conecte ambas etapas de acondicionamiento de señal y el otro para proporcionar el voltaje adecuado al *switch* (12 V) y a los amplificadores (5 V).

La segunda etapa empieza en el extremo del cable coaxial y se forma por elementos como amplificadores de bajo ruido, atenuadores y un filtro pasa bandas en el rango de frecuencias de 40 a 120 MHz, este filtro se forma por un filtro pasa altas, así como un pasa bajas; el rango de frecuencias puede variar debido a la naturaleza de los filtros y sus frecuencias de corte. La señal se atenúa al recorrer el cable coaxial, además puede insertarse ruido del medio e incluso el ruido generado por el cable; por lo que es necesario que pase por un arreglo de atenuadores y amplificadores para reducir el ruido. La cantidad de amplificadores y atenuadores a emplear depende de la potencia con que se reciba la señal, de ahí la importancia de que el coeficiente de reflexión se mantenga lo más plano posible en el rango de frecuencias mencionado. Para el caso de los filtros, el filtro pasa altas a emplear es el SHP-50+, siendo su rango de trabajo de 41 a 800 MHz y para completar el filtro pasa bandas se emplea el filtro pasa bajas SLP-100+ que trabaja en el rango de DC a 98 MHz, ambos filtros de Mini-Circuits. Los dispositivos mencionados, tanto amplificadores, atenuadores, filtros y el *switch* tienen conectores de 50Ω lo que permite que haya acoplamiento de impedancias y la transferencia de potencia sea óptima. En la Figura 5 se muestra la propuesta del sistema completo a implementarse.

Etapas de procesamiento

La señal debe ser procesada después del acondicionamiento, para esta etapa ha de emplearse la tarjeta ROACH2 (Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware) desarrollada por el grupo de trabajo CASPER (The Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research) de la universidad de Berkeley (CASPER, 2013). Esta tarjeta está basada en tecnología FPGA, cuenta con una FPGA Virtex-6 SX475T y en este caso cuenta con dos tarjetas ADC de 12 bits externas y una frecuencia de reloj de 400 MHz. Una parte indispensable para poder programar la tarjeta ROACH2 es la ambientación de una computadora, ya que se requiere de software específico para el trabajo con esta. Se requiere de una computadora con el sistema operativo Linux Ubuntu 14.04 o Ubuntu 16.04 instalado, así como Matlab versión 2013b y Xilinx ISE versión 14.07. En algunas ocasiones y dependiendo de la computadora será necesario realizar todo desde una máquina virtual por la incompatibilidad de drivers. El proceso de ambientación de una computadora se describe de forma general en la página de CASPER, sin embargo, cada caso puede requerir más acciones. Para poder procesar y visualizar la potencia de las señales se emplea un espectrómetro que se programa mediante bloques provistos en Matlab/Simulink, además se encuentra un ejemplo de espectrómetro de banda ancha en la página web de ROACH2. La tarjeta ROACH2 es un dispositivo dedicado exclusivamente al procesamiento de la señal, para la visualización y almacenamiento de los datos procesados, así como el control del *switch* se emplea una computadora tipo Raspberry Pi.

El sistema completo ha de alimentarse con 12 V de corriente continua ya que en su ubicación final no se dispone de energía eléctrica de corriente alterna y es necesario el uso de baterías de 12 V. Para controlar el *switch* y proporcionar alimentación a los amplificadores y demás componentes, se debe hacer uso de reguladores de voltaje y por ende se debe vigilar que el voltaje de alimentación sea el adecuado y no varíe, para que las lecturas sean confiables. Además del voltaje, otro aspecto a vigilar es la temperatura, ya que puede resultar en lecturas diferentes con los cambios de temperatura, para la adquisición de ambas variables se emplea una tarjeta Arduino UNO puesto que dispone de un ADC de 6 canales y además de otros protocolos de comunicación para conectar otros tipos de sensores, esta tarjeta puede comunicarse con la Raspberry Pi. Se propone el sensor DHT11 para medir la temperatura ya que su comunicación se basa en un solo cable y se pueden emplear varios de estos al mismo tiempo, para medir el voltaje se emplea el sensor FZ0430.

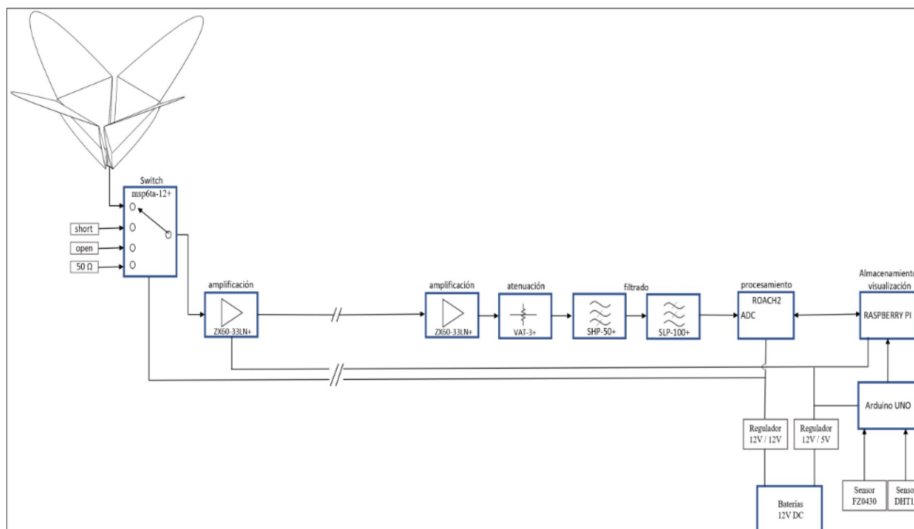


Figura 5. Diagrama del sistema a implementar en el experimento SCI-HI.

Comentarios Finales

Conclusiones

El sistema propuesto será capaz de trabajar en un rango de frecuencias de 70 MHz a 120 MHz al usar la antena Mango Peel como dispositivo receptor. El patrón de radiación de la antena, al ser direccional, permitirá observar el cielo a lo largo del día. Gracias a la programación de un espectrómetro de banda ancha en la tarjeta ROACH2, se tendrá un dispositivo dedicado exclusivamente al procesamiento de lo captado por la antena, sin perder tiempo máquina en otras tareas; además de que, al emplear los dispositivos de calibración, las lecturas serán más confiables. El uso de dispositivos especializados (switch, LNA, filtros y atenuadores) y con acoplamiento de impedancias permitirá la mayor transferencia de potencia. El sistema presentado, como parte del proyecto SCI-HI, estará destinado a la búsqueda de la señal de los primeros objetos luminosos en el Universo.

Referencias

- Bowman, J.D., Rogers, A.E.E. y Hewitt, J.N. "Toward empirical constraints on the global redshifted 212 cm brightness temperature during the epoch of reionization". [arXiv:0710.2541v1](https://arxiv.org/abs/0710.2541v1) [astro-ph]. 2007.
- Burns, J.O., Bradley, R., Tauscher, K., Furlanetto, S., Mirocha, J., Monsalve, R., Rapetti, D., Purcell, W., Newell, D., Draper, D., MacDowall, R., Bowman, J., Nhan, B., Wollack, E.J., Flalkov, A., Jones, D., Kasper, J.C., Loeb, A., Datta, A., Pritchard, J., Switzer, E. y Bica, M. "A space-based observational strategy for characterizing the first stars and galaxies using the redshifted 21-cm global spectrum". [arXiv:1704.02651v1](https://arxiv.org/abs/1704.02651v1) [astro-ph.IM]. 2017.
- Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research. https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ROACH2_2013.
- Jáuregui-García, J.M., Peterson, J.B., Castillo-Domínguez, E. y Voytek, T.C. "HIBiscus, a broadband antenna with matching impedance and uniform radiation pattern". IEEE AP-S. 2017
- Philip, L., Abdurashidova, Z., Chiang, H.C., Ghazi, N., Gumba, A., Heilgendorff, H.M., Hickish, J., Jáuregui-García, J.M., Malepe, K., Nunhokee, C.D., Peterson, J., Sievers, J.L., Simes, V. y Span, R. "Probing radio intensity at high-z from Marion: 2017 instrument". [arXiv:1806.09531v1](https://arxiv.org/abs/1806.09531v1) [astro-ph.IM]. 2018.
- Pritchard, J. R., y Loeb, A. "21-cm cosmology in the 21st Century". [arXiv:1109.6012v2](https://arxiv.org/abs/1109.6012v2) [astro-ph.CO]. 2012.
- Singh, S., Subrahmanyam, R., Shankar, N.U., Rao, M.S., Girish, B.S., Raghunathan, A., Somashekar, R. y Srivani, K.S. "SARAS 2: a spectral radiometer for probing cosmic dawn and the epoch of reionization through detection of the global 21 cm signal". [arXiv:1710.01101v1](https://arxiv.org/abs/1710.01101v1) [astro-ph.IM]. 2017.

Sokolowski, M., Tremblay, S.E., Wayth, R.B., Tingay, S.J., Clarke, N., Roberts, P., Waterson, M., Ekers, R.D., Hall, P., Lewis, M., Mossammaparast, M., Pdhi, S., Schlagenhauer, F., Sutunjo, A. y Tickner, J. "BIGHORNS- broadband instrument for global hydrogen reionisation signal". [arXiv:1501.02922v1](https://arxiv.org/abs/1501.02922v1) [astro-ph.IM]. 2015.

Voytek, T.C., Natarajan, A., Jáuregui-García, J.M., Peterson, J.B. y López-Cruz, O. "probing the dark ages at $z \sim 20$: the SCL-HI 21 cm all-sky spectrum experiment". The Astrophysical Journal Letters, 782:L9 (5pp), 2014 February 10.

3. Constancia póster



2do. Congreso de Tópicos Avanzados
de Óptica y Electrónica



El comité organizador del 2do. Congreso de Tópicos Avanzados de Óptica y Electrónica junto con la coordinación de Óptica del INAOE, otorga la presente constancia a:

SALOMÓN PALILLERO PÉREZ

por su participación con el trabajo "SCI-HI: Integración de antena Mango Peel en un radiómetro" en modalidad de póster el día 25 de noviembre del 2020.

Dr. Fermín Granados Salomón
Coordinador Departamento de Óptica INAOE

M.C. Ilse Ivonne Cázarez Aguilar
Presidenta OSA capítulo INAOE

Lic. Ana Elizabeth Espinoza Mómox
Presidenta SPIE capítulo INAOE

M.C. Hans Israel Morales López
Presidente IEEE capítulo INAOE



Gobierno de Puebla
Hacia el Fortalecimiento y el Desarrollo



Secretaría de Educación



INAOE



SPIE. STUDENT CHAPTER



4. Constancia de idioma

TOEFL ITP Score Report

Name of Institution: COLEGIO DE POSTGRADUADOS PUEBLA

Name: PALILLERQ SALOMON

Student Number: 14

DOB: 08/02/1986

Sex: M Degree:

Times Taken TOEFL: 1

Native Country: Mexico

Native Language: Spanish

Scaled Scores:

Listening Comprehension: 46

Test Date: 09/25/2020

Structure & Written Expression: 48

Form: TOEFL ITP

Reading Comprehension: 54

Total Score: 493



Student's File Copy
Do Not Copy

The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.

137012-16573 • FB619R100 • Printed in U.S.A.

I.N. 770462

Copyright © 2012 by Educational Testing Service.