

**UNIVERSIDAD ECCI**

Diseño y análisis de antena dipolo Hibiscus para  
radioastronomía

Alex Ferney Archila Herreño

TESIS PROYECTO DE GRADO

Proyecto de grado

Bogota, Colombia

Julio, 2022

## ABSTRACT

Este documento muestra los resultados de la implementación de una antena tipo Hibiscus, planteada para la detección de señales radio astronómicas en el rango de frecuencias entre 50 - 120 MHz; esto contribuye al estudio de la línea de 21 cm, de gran interés para la radioastronomía. La antena fue diseñada basada en la estructura Foursquare y luego simulada en 3D haciendo uso del software HFSS y así se obtuvo la respuesta en frecuencia. Adicionalmente el documento presenta una forma de optimizar el trabajo en el diseño del modelo 3D, que fue lo que se hizo en python. Una vez diseñada la antena se implementó y se obtuvo una respuesta del parámetro S11 haciendo uso del analizador de vectorial de redes o VNA, el cual arrojó datos que permitieron comparar y generar conclusiones sobre la respuesta de la antena Hibiscus implementada contra la respuesta ideal. De los análisis que se realizaron se pudo concluir que, para los parámetros establecido y las medidas de diseño, la respuesta de la antena es de banda angosta y no alcanza el rango preferido, llegando a un rango de 48.6 a 57.4 MHz.

Key Words: Hibiscus o radiastronomía, HFSS, S11.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Diseño de la antena Hibiscus</b>	<b>8</b>
2.0.1	Escalamiento de la antena . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>19</b>
3.0.1	Medición - Analizador de redes vectoriales (VNA) . . . .	20
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>23</b>

# List of Figures

2.1	Antena Foursquare sobre un plano tierra. Donde <b>12,14,16,18</b> región de cuadrados metálicos, <b>22</b> Plano tierra y $E_R$ Permi- tividad Relativa . . . . .	10
2.2	Respuesta parámetro S11 simulado respecto a la variable gap.	12
2.3	Variables de antena Hibiscus diseñada 3D. . . . .	13
2.4	Ángulos de inclinación de los pétalos y distancia al plano tierra.	14
3.1	Implementación Antena tipo Hibiscus 2 pétalos. . . . .	20
3.2	Comparativo parámetro S11, simulado (HFSS) vs medido (VNA).	21

# List of Tables

2.1	DIMENSIONES ANTENA HIBISCUS . . . . .	15
-----	---------------------------------------	----

# Chapter 1

## Introducción

En muchas ocasiones se ha especulado sobre el universo respecto a su antigüedad y su evolución. Para aportar a los interrogantes se prevé hacerlo rastreando y recuperando la señal generada por el hidrógeno neutro en el universo temprano. Así como lo afirma la entidad Naukas, al haber un cambio del espín o momento angular del electrón del átomo de hidrógeno, se genera una señal con una frecuencia alrededor de 1420 MHz como se evidencia en el documento [1], es decir, una señal de longitud de onda alrededor 21cm.

Como ya se conoce la frecuencia de la señal emitida se puede diseñar una antena para detectarla. Sin embargo, es necesario entender que el universo se está expandiendo, es decir, sus elementos como estrellas, constelaciones y planetas, se están desplazando a lo largo del mismo. Lo que indica que para poder observar dicha señal se debe tener en cuenta que se está desplazando al rojo en el espectro. Por lo tanto para la detección de la señal de 21cm, se necesita diseñar e implementar una antena que permita detectar señales

comprendidas entre 50 y 120 MHz. Con esto se podría detectar esta señal y se alcanzaría a obtener información sobre el nacimiento de las primeras estrellas desde el comienzo de los elementos celestes. Además, esta señal pertenece al grupo de las microondas, por ende puede desplazarse y llegar hasta la superficie del globo terráqueo como se aduce en el documento [1], esto implica que implementando la antena correcta con los parámetros necesarios y un centro de análisis de señales radio astronómicas, pueda medirse desde la tierra, analizar los datos y generar conclusiones sobre la formación de las estrellas, la evolución de las galaxias o del mismo universo.

Esta investigación direccionó el desarrollo a enfocar el estudio en la antena Hibiscus, ya que la antena, según su teoría, responde de manera positiva a los parámetros de frecuencia y adaptabilidad que necesitamos para observar la señal.

La antena Hibiscus es viable por tres razones. La primera, que sus componentes son a fin de su función, es decir, los insumos que se usaron como la base de la antena fueron de materiales de baja incidencia negativa en la función de antena. La base fue construida con material Empack y dadas sus propiedades no interfiere considerablemente en el patrón de la antena, permite que el plano tierra incida directamente sin pérdidas a los pétalos los cuales se construyeron con láminas de cobre. Estas fueron torneadas con las medidas de diseño y forma de pétalo hexagonal. La segunda razón que hizo viable el desarrollo de la antena es su bajo costo de implementación, en los materiales y las dimensiones de la misma. La tercera razón de viabilidad de la antena gira entorno al proceso de escalamiento ya que por sus dimensiones se logró caracterizar la antena en el laboratorio. De lo contrario se habría requerido un lugar mucho más

grande y los equipos de medición en ese entorno para lograr caracterizarla; teniendo en cuenta la dificultad de maniobrar la antena.

Esta caracterización de la antena Hibiscus se logró por medio de mediciones obtenidas usando un analizador de redes vectoriales o VNA; este nos permitió medir y comparar los resultados del comportamiento de la antena; Los cuales fueron buenos ya que presentan una similitud al patrón de la antena teórica, para este caso la documentada en [4].

## Chapter 2

# Diseño de la antena Hibiscus

- Diseño (5-15 pages)

Para esta etapa se investigó sobre algunas antenas y a partir de su forma diseñar la antena Hibiscus. Un ejemplo es la inserción de la antena en México, isla Guadalupe [2], muy cerca del océano pacífico, por su entorno limpio de señales que pueden interferir para capturar la señal deseada. Esta antena se empezó a diseñar con base a la antena Blade, separando inicialmente 2 láminas para generar un dipolo, ya que el segundo dipolo correspondería a una copia balanceada del dipolo base. Esta decisión, se basó en poder encontrar los valores de adaptación y ancho de banda deseados, obteniendo un punto de partida en un dipolo funcional. Además, variar dos dipolos divididos en cuatro 4 pétalos al mismo tiempo, modificando sus cortes, ángulos y dimensiones, hacía incrementar el tiempo de desarrollo y análisis por el software. Lo que resultaba en un mayor gasto computacional y de tiempo. Para obtener al menos una respuesta considerable de la antena, incluso cada vez que se modificaba un parámetro

de la misma.

$$h_p = \frac{1}{4} \frac{\lambda}{\sqrt{E_R}} \quad (2.1)$$

Otro ejemplo de antena de donde se extrajo información relevante para el diseño, fue una antena de cuatro cuadrantes o foursquare [3], la cual fue implementada inicialmente con dirección horizontal, paralela al plano tierra y sin inclinación alguna tal como se refleja en Fig. 2.1. Se puede evidenciar 4 láminas enumeradas como 12, 14, 16 y 18, las cuales son los cuadrantes que componen la antena y tienen una separación llamada  $w$  entre sí, y se encuentran a una altura respecto del plano tierra enumerando 22; a una distancia de  $1/4$  sobre la relación entre  $\lambda$  y la raíz cuadrada de la permitividad relativa entre la antena y el plano tierra como se ve en la ecuación (2.1).

A esta tipología la segmentan obligando a que el valor  $w$ , es decir la separación entre pétalos definido con la letra  $w$ , sea mucho menor al del  $\lambda$  como se muestra en (2.2) para que su respuesta sea la esperada.

Además, la medida de  $w$  debe ser tomada diagonal entre las láminas.

$$w \ll \lambda \quad (2.2)$$

De esta antena de cuadrantes se desprenden algunos prototipos entre otros, la Hibiscus. Esta ha sido simulada en el software FEKO para luego ser implementada en el laboratorio de antenas educativas remotas [4]. La respuesta de esta antena ha dejado características muy relevantes para la

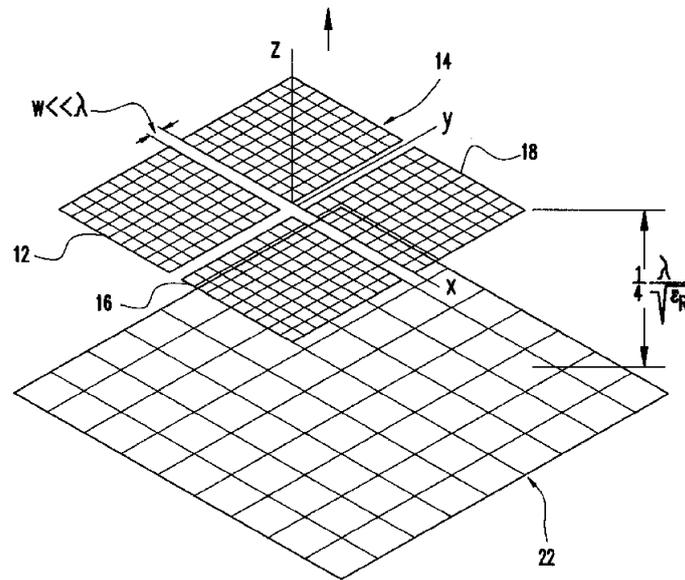


Figure 2.1: Antena Foursquare sobre un plano tierra. Donde **12,14,16,18** región de cuadrados metálicos, **22** Plano tierra y  $E_R$  Permitividad Relativa

observación de señales dentro del rango de 50 a 120 MHz. Algunos de los parámetros que se deben tener en cuenta, al momento de diseñar la antena, en función de la respuesta de esta son:

- Al dividir los trapecios y generarles una pendiente se mejora la armonía de la impedancia.
- La altura sobre el plano genera cambios en la simetría del patrón de radiación de la antena.
- Los ángulos de los triángulos y los trapecoides modifican el ancho del patrón de la antena.
- La separación de los segmentos entre sí, tiene una mayor incidencia sobre la impedancia de la antena.

La respuesta teórica de esta antena es de 50 a 112.5MHz, es decir 62.5 MHz de ancho de banda y su mejor rango de adaptabilidad va hasta -24 dB.

Resulta pertinente tener en cuenta la variable lambda ya que esta corresponde a la longitud de onda y depende de la frecuencia de la señal y la velocidad de la luz, tal como se evidencia en (2.3), donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $f$  corresponde a la frecuencia. Esta ecuación por mas simple que parezca permite vincular la frecuencia que se requiere medir y la longitud de la onda; luego, se determinó que la longitud de onda para capturar de la señal es de 3,75 m. Por consiguiente se procede a determinar la longitud total de las láminas o pétalos de la antena.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

Ya que el modelo de la antena Hibiscus se basa inicialmente en una antena de configuración dipolo, se separan cada lámina y se obtiene la medida de lo largo de los pétalos. Una vez se obtiene el largo de cada lámina se extrae su ancho teniendo en cuenta que dicha longitud, para un dipolo con base en la antena Blade, no puede ser mayor al 80% del largo, como se expresa en el análisis [5], por ende se extrae el valor pertinente y se obtiene su ancho. Así mismo como el ancho y largo son dependientes de los valores iniciales, para el diseño de la antena se procede calculando el gap como se evidencia en (2.4), es decir, la separación entre las láminas. Se procede a encontrar el valor dividiendo entre 2, por la cantidad de polos, y un valor constante para hacer este valor mas pequeño; con esto se debe tener en cuenta que los dipolos se encuentran separados por este gap simétricamente desde el punto de origen y deben ubicarse de esta manera.

$$gap = \lambda \frac{1}{(2 * 70)} \quad (2.4)$$

Cuando ya se obtuvo el valor de gap se procedió a volverlo una variable, lo que permitió al modelo ser optimizado para observar el comportamiento de la antena en función de dicha variable. Lo que se puede evidenciar en Fig. 2.2 es una relación inversamente proporcional al tamaño del gap, mientras este disminuya, su adaptabilidad mejora e incrementa el ancho de banda.

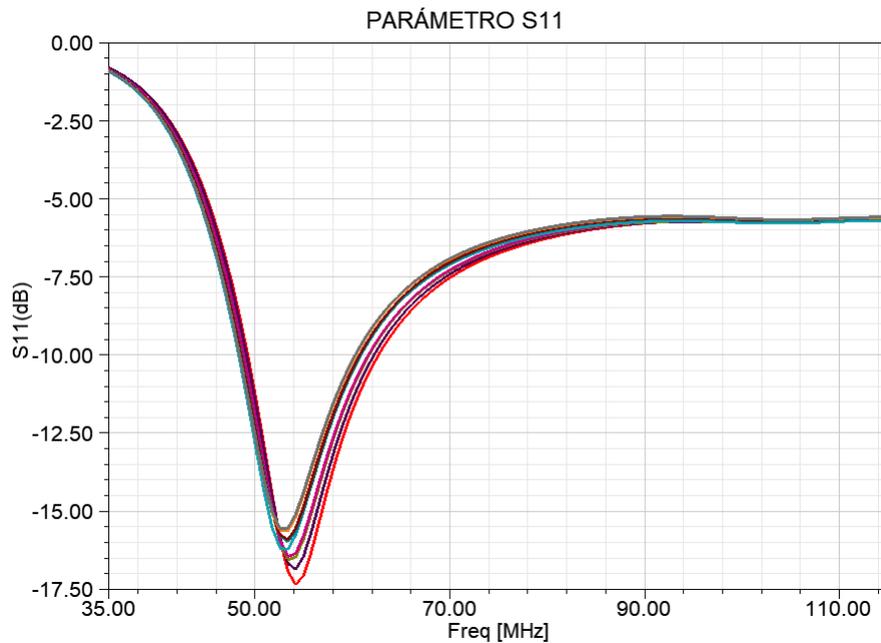


Figure 2.2: Respuesta parámetro S11 simulado respecto a la variable gap.

Esta medida es de suma importancia ya que se puede ampliar el ancho de banda de la antena para acercarse a la respuesta ideal de 62,5 MHz; sin embargo, llegando al límite de este valor del gap se debe verificar la simetría del parámetro para cambiarlo e incrementar este ancho de banda.

A los parámetros ya establecidos de la antena Hibiscus se le añaden unos cortes diagonales, también llamados chamfer, para darles la forma de pétalos y así mejorar el ancho del patrón de la antena, se procede generando los cortes diagonales en las láminas, tal como se muestra en Fig. 2.3 los cuales se nombran como  $a_2$  y  $a_3$ .

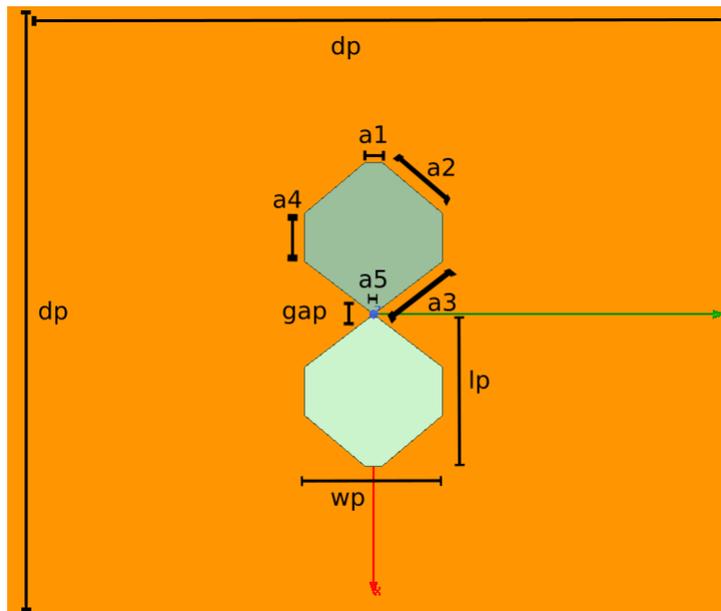


Figure 2.3: Variables de antena Hibiscus diseñada 3D.

También se inclinan los pétalos respecto al eje central comenzando con valores entre 0 y 90 grados, luego se observa su comportamiento. Esto hace que exista una variación en cuanto a las longitudes del  $gap$  y la distancia de altura respecto al plano tierra, medidas que se toman en cuenta para la respuesta final de la antena y la elaboración e implementación física de la misma.

Una de las ventajas al realizar la simulación es obtener la antena y

optimizarla; lo que permite extraer la mejor opción de acuerdo a las medidas sin tener que perder insumos de elaboración para la antena. Las variables puestas a prueba fueron el gap como variable principal, el grosor de las láminas o pétalos, el ancho y largo del plano tierra y la inclinación de los pétalos.

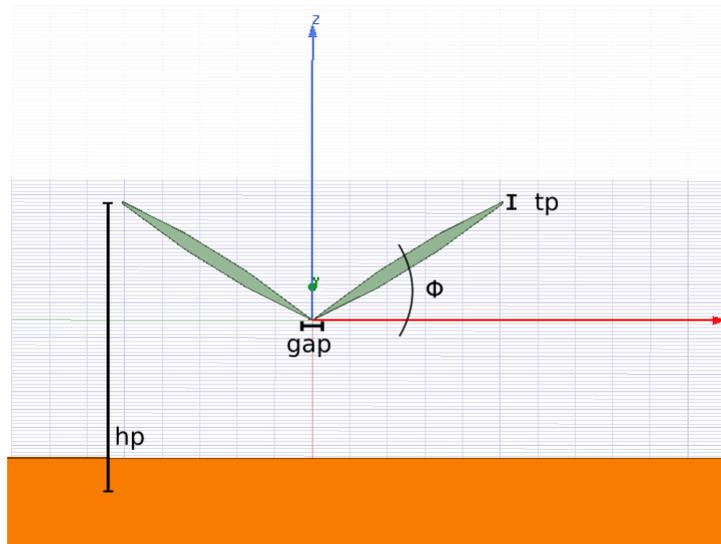


Figure 2.4: Ángulos de inclinación de los pétalos y distancia al plano tierra.

Luego de haber obtenido las dimensiones de la antena, se diseñó un modelo 3D en el software HFSS, teniendo en cuenta la parametrización de los elementos a simular, por ejemplo la caja de aire y las láminas de cobre; esto permitió valores simulados cercanos a la realidad.

El diseño se hace de la mano con programación python creando un archivo script permitiendo diseñar la antena Hibiscus, con las variables requeridas y sus medidas definidas. Se separan los script en diseño, en parametrización de módulos de medición y la generación de gráficos para tener control de

Table 2.1: DIMENSIONES ANTENA HIBISCUS

#	DIMENSIÓN	DISEÑADA	ESCALADA
1	fo	80 MHz	800 MHz
2	$\lambda$	3.75 m	0.375 m
3	lp	1.181 m	0.1181 m
4	hp	1.1 m	0.11 m
5	dp	5 m	0.5 m
6	gap	2.29 cm	0.229 cm
7	wp	93.5 cm	9.35 cm
8	tp	10 mm	1 mm
9	a1	110.66 mm	11.06 mm
10	a2	565.68 mm	56.56 mm
11	a3	381.25 mm	38.12 mm
12	a4	594.64 mm	59.46 mm
13	a5	30.6 mm	3.06 mm
14	$\phi$	32°	32°

todo código y poder abarcar los errores que existieran.

La forma en que se diseñó mediante python al crear un objeto, se hizo por medio de una clase llamada caja la cual contenía atributos relacionados a su ancho, grosor, dimensión, ubicación en el plano (x,y,z) y el ángulo de inclinación. También se cargaron objetos a los cuales se nombraron cajas para crear los cubos. Este diseño inicial con programación lo hizo funcional

dado que los objetos creados son la base de elementos para la implementación de la antena Hibiscus. Luego de ello se reutilizó el código varias veces para añadir mejoras u optimización de dibujo en 3D.

Adicionalmente el alcance de esos archivos script es que permiten ser mejorados en cuanto al código interno, reutilizando las líneas escritas y haciendo ejecutar menos líneas de código, reduciendo así el tiempo de respuesta del archivo script.

La programación se desarrolló haciendo uso de clases predefinidas que se entienden con el software HFSS. Estas provienen de una librería llamada editor, que permite usar funciones para crear figuras, editar propiedades intrínsecas de cada elemento creado, creación de puertos o elementos específicos, aplicar rotaciones a los elementos creados y aplicar recortes de acuerdo a la necesidad.

- oEditor.CreateBox()
- oEditor.ChangeProperty()
- oEditor.CreateRectangle()
- oEditor.Rotate()
- oEditor.Chamfer()

Cada función relacionada contiene los atributos pertinentes que lo componen, es decir, nombres, tipos, definiciones, valores en las diferentes coordenadas (x,y, z), colores y valores de material, que a su vez permiten ser cambiados a conveniencia del diseñador. Esto abre una puerta grande para vincular, por medio de la modificación de objetos, un diseño ordenado y rápido por programación de código, desplazando y acortando los tiempos de demora presentados en la modificación de cada parámetro de los objetos y en la creación de los mismos.

### **2.0.1 Escalamiento de la antena**

Luego de obtener un modelo de antena Hibiscus simulada y optimizada en su respuesta de adaptabilidad, se escala. Es decir, se reducen las dimensiones físicas de diseño de la antena a un factor 1/10 obteniendo los valores referenciados en tabla I. Este proceso es necesario, dado que, permite medir en laboratorio un prototipo, en este caso, uno de menor tamaño por la facilidad de construcción, adicional se reduce el costo de materiales para la elaboración.

Una vez escalada se adquieren los materiales para tornearlos con tal precisión, a fin de obtener las medidas mas cercanas al modelo diseñado y simulado. Esta antena responde a su adaptabilidad, reflejando sus resultados en el parámetro S11; por tal razón se siguen los lineamientos arrojados por el software HFSS en la implementación física de la antena. Los elementos a usar son láminas de cobre para los pétalos de la antena, aluminio para el plano tierra y un conector SMA hembra horizontal cuya medida, entre los pines de conexión, es de 1,6 mm; dado que es comercial y

se ajusta al modelo diseñado.

Para la fijación y estabilidad de la antena fue importante pegar las láminas de los pétalos a las bases laterales y reposar las en una base central; lo que permitió una sola estructura fija, mejorando la estabilidad y la fijación a las medidas de diseño.

La antena contiene un plano tierra que permite orientar la radiación hacia arriba y cambiar la adaptabilidad de la antena, sin embargo, hay ciertos parámetros para la longitud y la distancia que se deben tener en cuenta desde el plano tierra hasta la antena, esta distancia se obtiene por medio de la optimización de la variable altura de plano tierra.

La antena genera un patrón de radiación ascendente hasta la parte superior y no alrededor de las láminas o envolvente, ya que el plano tierra desplaza y lo impulsa hacia arriba. El plano tierra, cuyas medidas fueron de 50 x 50 cm, fue proveído por el laboratorio para generar las respectivas mediciones teniendo en cuenta que su composición es de aluminio y su grosor de 3 mm.

# Chapter 3

## Resultados

- Resultados (16-19 pages)

Se obtiene una antena tipo Hibiscus funcional con respuesta congruente a la simulada, con un tamaño ideal para su manipulación y de bajo costo. Una vez terminada la antena se obtuvo la respuesta reflejada en el parámetro S11.

La antena está soportada en una base compuesta de láminas de prolietileno de alto peso molecular llamado empack de 5 mm de grosor y está constituida de láminas de cobre de 1,2mm de grosor, un puerto SMA de 1,6mm, y el plano tierra cuyo material es aluminio de grosor 3 mm. Las láminas de cobre se adhieren a la base principal de Empack, tal como se muestra en la Fig. 3.1, y el pilar central o base principal tiene en su parte posterior un corte diagonal con ángulo de inclinación de 32°. Este ángulo corresponde al grado de inclinación que necesitan las láminas para obtener la respuesta esperada sobre una antena de este tipo.

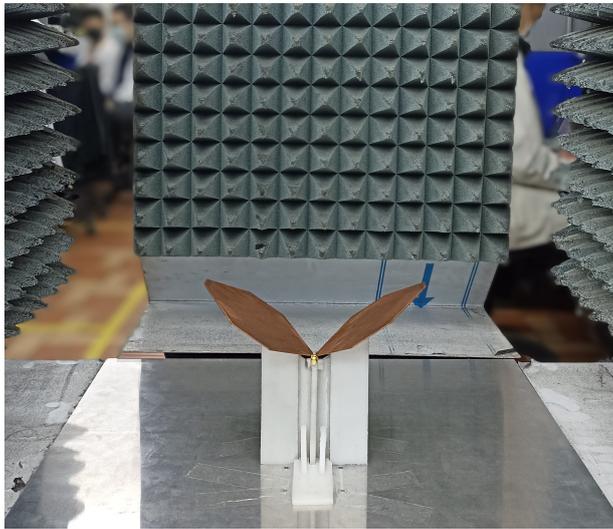


Figure 3.1: Implementación Antena tipo Hibiscus 2 pétalos.

### 3.0.1 Medición - Analizador de redes vectoriales (VNA)

Para la medición de la antena es pertinente resaltar una necesidad que se obtuvo; esta fue medir con un plano tierra lo suficientemente grande para que la incidencia sobre la antena, aparentara ser un plano de tierra infinito respecto a las dimensiones de la antena.

Una vez ubicado el plano tierra y la fijación de la antena sobre el mismo, se procedió a configurar el VNA con los parámetros similares a los de la simulación. El analizador de redes vectorial es un elemento de medición para aplicaciones de alta frecuencia y RF, que permite corroborar los resultados obtenidos por simulación y para este caso someter la antena a lectura sobre la adaptabilidad. La cantidad de puntos configurados para la obtención de resultados son 1201 puntos, con un rango de frecuencia comprendido entre 35 MHz y 115 MHz y en frecuencia de corte en 75 MHz.

La respuesta del VNA nos permitió una lectura de un ancho de banda de 8.8 MHz con adaptabilidad de -14,17dB. Los cuales se pueden evidenciar en la comparación de Fig. 3.2 contra los valores obtenidos en la simulación.

Los resultados obtenidos de la antena Hibiscus, el parámetro S11 proveniente de la versión optimizada y a escala de la antena con los resultados arrojados por el VNA.

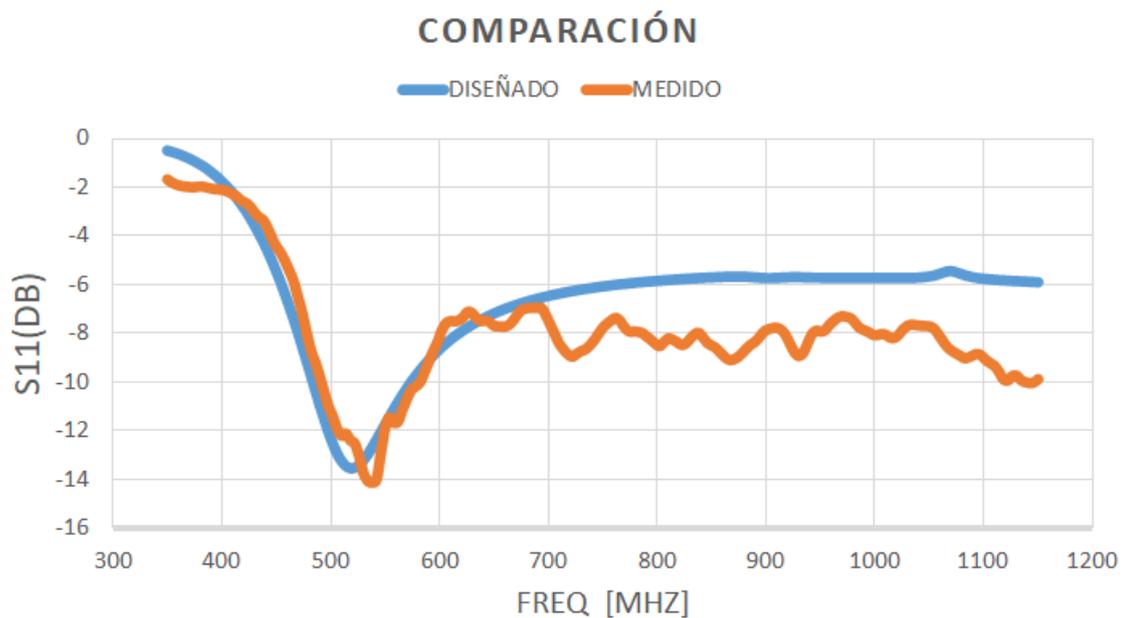


Figure 3.2: Comparativo parámetro S11, simulado (HFSS) vs medido (VNA).

En el comparativo de Fig. 3.2 se permite mostrar como la adaptabilidad intenta conservarse a lo largo de su comportamiento respecto a los valores de la antena simulada, sin embargo existe una variación en la respuesta de la antena implementada desde que la misma mejora su nivel de adaptación y por lo tanto tiende a ampliar el ancho de banda. Además el valor de adaptabilidad se mantiene muy similar al mejor rango de la antena simulada.

Así mismo se evidencia en Fig. 3.2, que en cuanto a la respuesta de la antena, en el parámetro S11, el nivel de adaptabilidad es bueno, supera los -10dB, valor mínimo requerido y llega hasta -13,57dB. Arroja un ancho de banda de tan solo 9,09 MHz, lo que se asemeja a una respuesta de banda angosta. También se puede ver la respuesta de la antena frente a la simulada y se encuentra con una respuesta muy similar, alcanzando los valores de adaptabilidad simulados y su ancho de banda esperado, es decir, -14,17 dB con ancho de banda de 8,8 MHz, sin embargo existe una tendencia que puede llegar a ampliar el rango del ancho de banda. Lo anterior puede estar asociado a la separación entre láminas o gap, el ángulo de los triángulos y los trapezoides formados por los cortes o chamfer al momento de su implementación física.

La simulación realizada arrojó como resultado una antena de banda angosta, incluso habiendo optimizando las variables de gap, la altura del plano tierra respecto a la antena y los ángulos de inclinación; aún así permanecía su comportamiento orientado a banda angosta tal como se evidencia en Fig. 2.2. La relación entre la antena simulada y la caracterizada nos permite encontrar una diferencia tan solo de -0,6 dB y para el ancho de banda es de 290 KHz.

# Chapter 4

## Conclusiones

- Conclusiones (20-22 pages)

Se logró diseñar e implementar una antena Hibiscus haciendo uso de elementos conductores como una lámina de cobre, aluminio y otros elementos permeables de señales de radio como el empack; este funcionó como estructura principal y soporte a la antena.

Se diseñó un modelo de antena Hibiscus basada en la antena Foursquare la cual fue simulada usando el software HFSS. Esto nos permitió obtener un modelo 3D de la antena el cual se complementó con programación python. Por lo tanto se concluye que HFSS es una herramienta funcional y fiel a los resultados reales de la antena propuesta.

El vínculo que se generó entre HFSS y la programación en python, permitió recortar tiempos de diseño ya que los parámetros de la antena se gestionan por medio de código y la ejecución del mismo es muy rápida respecto a la interacción de dibujo 3D en el software de diseño HFSS. Este método

permitió aprovechar mejor los recursos computacionales en función de la respuesta de la antena reflejada en el parámetro S11.

Otra herramienta que se usó para mejorar los resultados de la antena es el optimetrix, herramienta incluida en el software HFSS. Este optimizador permitió poner a prueba variables y ver el comportamiento de la antena cuando se sometía a cambios de las variables. De esta optimización se concluye que entre mas pequeño sea el gap, mayor sea el grosor de las láminas y mayor el espaciado entre el plano tierra y la antena, habrá mejor adaptación en la respuesta del parámetro S11.

El proceso de optimización orientado a la inclinación de las láminas permite concluir que, mientras se aumente la inclinación de los pétalos, el patrón completo tendrá un desplazamiento en el eje de frecuencia hacia la derecha.

Dado que para capturar la señal situada entre 50 y 120 MHz se requiere una antena de 2,5 y 6 metros de longitud. Esto generó la necesidad de escalarla a un factor 1/10, permitiendo caracterizarla en un laboratorio con mayor comodidad. Se obtuvo el parámetro S11 y con ello se concluye que la fidelidad del procedimiento de escala es viable ya que el resultado de la antena real es muy similar al simulado.

Una vez se obtuvo la antena 3D simulada y la implementada físicamente en el laboratorio, se procedió a generar la respuesta de cada una, representadas en los parámetros S11, de los cuales se pudo concluir que la antena implementada físicamente es funcional y tiene una adaptabilidad de -14,17 dB en un rango de ancho de banda entre 48.6 MHz y 57.4 MHz, es decir, de 8,8 MHz. mientras que la antena simulada en HFSS tiene una adaptabilidad de -13,57 dB en un ancho de banda de 9,09 MHz.

De acuerdo a la respuesta, en el parámetro S11 de la antena implementada físicamente, se concluye que las medidas de separación entre láminas, los cortes y los respectivos ángulos de inclinación aplicados a los pétalos, no hacen esta antena funcional para radio astronomía ya que la respuesta es de banda angosta y no un rango mas amplio como se esperaba inicialmente.

# Bibliography

- [1] Sánchez, Á. L. (2017). La emisión del hidrógeno neutro a 21 cm. *Cultura ci*, 5. <https://culturacientifica.com/2017/01/20/hidrogeno-universo-i-la-emision-del-hidrogeno-neutro-21-cm/>
- [2] Tabitha C. Voytek, Aravind Natarajan, José Miguel Jáuregui García, Jeffrey B. Peterson, Omar López-Cruz. (2014). “PROBING THE DARK AGES AT Z20: THE SCI-HI 21CM ALL-SKY SPECTRUM EXPERIMENT.” NOAA, 6.
- [3] Va., J. R. N. (1999). FOURSQUARE ANTENNA RADIATING ELEMENT (Patent No. 5926137). In Patent (No. 5926137).
- [4] Jáuregui Garcia, Jose Peterson, Jeffrey Castillo Domínguez, Edgar Voytek, Tabitha. (2017). Hibiscus, a broadband antenna with matching impedance and uniform radiation pattern. 697-698. 10.1109/APUS-NCURSINRSM.2017.8072391.
- [5] Manrique, J. A. S. (2022). Diseño y análisis de antena tipo dipolo Blade de ancho de banda de 40MHz a 120MHz. 6.