

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA RADIANTE BASADO EN
ANTENAS YAGI-UDA QUE IMPLEMENTE LA TÉCNICA DE
BEAMFORMING A UNA FRECUENCIA DE OPERACIÓN DE 6 GHz
DISEÑO, SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA ESTRUCTURA
DE ANTENAS IMPRESAS YAGI-UDA DESARROLLADO CON LA
HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN CST STUDIO SUITE**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
TELECOMUNICACIONES**

CRISTINA ESTEFANÍA PAZ DÁVALOS

cristina.paz@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

hernan.barba@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, CRISTINA ESTEFANÍA PAZ DÁVALOS declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

CRISTINA ESTEFANÍA PAZ DÁVALOS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CRISTINA ESTEFANÍA PAZ DÁVALOS, bajo mi supervisión.

DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CRISTINA ESTEFANÍA PAZ DÁVALOS

DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

DEDICATORIA

Este proyecto dedicado con todo el amor del mundo a quienes confiaron en mí, creyeron en mí y jamás me abandonaron en este trayecto.

A mi razón de ser Ezequiel, gracias por tu compañía.

A mis ángeles de luz Guadalupe, Iván, Alejandro y Christian, gracias por su apoyo incondicional.

A mis personas fuentes de luz y paz Melida y Alfonso, gracias por su presencia en mi vida y apoyo en cada etapa de mi vida.

A mis compañeros de cuatro patas Jack y Bob, me demostraron amor de otra forma,

A mi familia en general y amigos que están presentes conmigo hasta hoy, con un mensaje, llamada o palabra de aliento.

En especial, a mí que sigo persiguiendo mis sueños, metas y aspiraciones, por elegir mi amor propio y felicidad.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por permitirme estar viva.

Agradezco la vida y presencia de mi hijo Ezequiel quién es mi mayor inspiración en esta vida, llegó para jamás dejarme sola.

A mi madre Guadalupe por la lucha diaria que me ha enseñado, su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida y su guía en cada etapa lograda.

A mi padre Iván porque jamás me ha soltado a pesar de las circunstancias, gracias por estar siempre pendiente de mi con pequeños actos.

A mi hermano Alejandro por ser mi mentor y guía, agradezco su motivación para culminar esta etapa, no olvidaré los estados motivadores que escribió en mi red social.

A mi hermano Christian quién me demostró la valentía por tomar un camino libre, feliz y responsable, gracias hermano por ser mi ejemplo de vida a pesar de ser el hermano menor.

A mis abuelitos, gracias por su vida, su presencia a pesar de la edad, gracias por cuidarme desde pequeña esos momentos los llevo en mi corazón. Por fin hoy podrán verme terminar esta etapa universitaria.

Agradezco al Dr.-Ing. Hernán Barba por sus conocimientos compartidos durante el desarrollo de este proyecto al igual por su paciencia brindada hacia mí. Gracias infinitas.

Gracias universo por alinearte para mí y permitirme encontrar a hermosas personas en este trayecto, gracias a todos por cada ocurrencia, tristeza y locura vivida en esta etapa. Gracias amigos por su aguante a esta persona.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE.....	2
1.4 MARCO TEÓRICO	3
1.4.1 TEORÍA BÁSICA DE ANTENAS.....	3
1.4.1.1 PARÁMETROS DE UNA ANTENA.....	4
1.4.1.2 TIPOS DE ANTENAS	5
1.4.2 ANTENA IMPRESA.....	5
1.4.3 ARREGLO DE ANTENAS.....	7
1.4.4 ANTENA YAGI-UDA	7
1.4.5 TÉCNICA BEAMFORMING	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 CST STUDIO SUITE.....	11
2.1.1 DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	11
2.1.2 OPTIMIZACIÓN AUTOMÁTICA	11
2.1.3 MANIPULACIÓN DE CST STUDIO SUITE.....	12
2.2 ANTENA DIPOLO	17
2.3 ANTENA YAGI-UDA IMPRESA.....	21
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
3.1 RESULTADOS.....	27
3.2 CONCLUSIONES.....	29
3.3 RECOMENDACIONES.....	30
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
ANEXOS	35

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular contempla el diseño, simulación y optimización de un arreglo de cuatro antenas Yagi-Uda impresas usando la técnica *beamforming* para una frecuencia de operación de 6 GHz.

Primeramente, se revisa una breve introducción acerca de la teoría de antenas, características de la antena Yagi-Uda, antenas impresas y técnica *beamforming*. Luego se realiza el diseño, simulación y optimización de una antena dipolo impresa de media longitud de onda a la frecuencia de trabajo de 6 GHz, se desarrolla una antena Yagi-Uda impresa para la frecuencia de trabajo y finalmente se ensambla el arreglo de antenas Yagi-Uda impresas para 6 GHz deseando una cobertura con un ángulo azimuth de 180°.

El análisis de estos diseños mencionados anteriormente y los resultados obtenidos se desarrollan en el software de simulación CST Studio Suite.

PALABRAS CLAVE: antena dipolo, antena Yagi-Uda impresa, arreglo de antenas Yagi-Uda, tecnología *microstrip*, técnica *beamforming*, CST Studio Suite.

ABSTRACT

This Curriculum Integration Work contemplates the design, simulation and optimization of an array of four printed Yagi-Uda antennas using the beamforming technique for an operating frequency of 6 GHz.

Firstly, a brief introduction about antenna theory, Yagi-Uda antenna characteristics, printed antennas and beamforming technique is reviewed. Then the design, simulation and optimization of a half wavelength printed dipole antenna at the working frequency of 6 GHz is carried out, a printed Yagi-Uda antenna is developed for the working frequency and finally the Yagi antenna array is assembled. -Uda printed for 6 GHz wishing coverage with an azimuth angle of 180° .

The analysis of these designs mentioned above and the results obtained were developed in the CST Studio Suite simulation software.

KEYWORDS: dipole antenna, printed Yagi-Uda antenna, Yagi-Uda antenna array, microstrip technology, beamforming technique, CST Studio Suite.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicación han evolucionado de manera muy rápida en los últimos años. Con el advenimiento de la tecnología 5G, ha despertado el interés en la investigación enfocada a las frecuencias de operación alojadas en la banda de ondas milimétricas [1], [2]. La transmisión de ondas electromagnéticas se propaga por el espacio libre de preferencia con línea de vista, este sistema funciona enviando la señal desde una antena transmisora a una antena receptora.

Una de las principales características que ofrece esta tecnología es la conformación de haces (*beamforming*) así como sus redes (*beamforming networks*) [3]. La técnica de conformación de haces permite sobrellevar una dificultad relacionada propiamente con la característica de esta tecnología en términos de atenuación, pérdida de línea de vista, reflexiones por multitrayectoria, entre otros [4].

Actualmente, existen diferentes implementaciones para la utilización de elementos radiantes impresos como antenas tipo patch y estructuras similares a microstrip (pero sin plano de masa), basadas en antenas elementales tales como el monopolo y el dipolo las cuales han sido ampliamente desarrolladas. Las ventajas inherentes de este tipo de implementaciones radican en la facilidad de integración en circuitos impresos, espacio ocupado y costo de producción [5].

La implementación de la técnica *beamforming* se vuelve un desafío en adaptarlo a las nuevas y diferentes aplicaciones, la cual implica elementos radiantes que direccionen el máximo del lóbulo de radiación de un sistema (arreglo) de antenas hacia los dispositivos deseados por el usuario.

La antena Yagi-Uda siendo un modelo importante y práctico en las comunicaciones brinda a diferentes aplicaciones mejorar parámetros de la antena, su fácil construcción permite una manipulación amigable al momento de la implementación. La característica más relevante de la antena Yagi-Uda es la directividad, por ello es la más usada ya que entrega la mayor radiación hacia un punto fijo. Para mejorar el resultado de una antena Yagi-Uda se juntan varias antenas formando un sistema de antenas logrando obtener mejores características de directividad y ganancia que una sola antena.

Ahora en las comunicaciones se desea mejorar la experiencia de conectividad del usuario con sus dispositivos. Por ello se propone diseñar y modelar un sistema de antenas conmutadas, con el fin de obtener una buena recepción de la señal, mínimas interferencias y aumento en la capacidad de reutilización de las frecuencias [6].

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño, simulación y optimización de una estructura de antenas impresas Yagi-Uda impresas modelada en la herramienta de simulación CST Studio Suite.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar brevemente la técnica *beamforming*.
- Detallar las características de diseño de una antena Yagi-Uda.
- Simular una antena Yagi-Uda impresa para una frecuencia de operación 6 GHz.
- Simular el sistema de antenas impresas Yagi-Uda.
- Analizar los resultados obtenidos en la simulación en términos del desempeño radiante del sistema.

1.3 ALCANCE

Este proyecto contempla el diseño, simulación y optimización de un sistema de 4 antenas impresas del tipo Yagi-Uda que servirá para la implementación de la técnica *beamforming* a una frecuencia de operación de 6 GHz.

En primer lugar, se detalla brevemente la técnica de *beamforming* como característica de relevancia en aplicaciones 5G. Se revisarán las características de una antena Yagi-Uda, así como su procedimiento de diseño. Con relación a la literatura, se revisarán diversas implementaciones relacionadas con antenas impresas del tipo Yagi-Uda, así como arreglos de éstas para propósitos similares al proyecto planteado.

La Figura INTRODUCCIÓN.1 muestra la estructura a realizarse. Se realiza el diseño, modelado y simulación de una antena Yagi-Uda impresa sobre un substrato FR4 asumiendo una permitividad de 4,3 para una frecuencia de operación de 6 GHz basado en una alimentación del tipo *microstrip* reportada en [7]. Para la implementación y optimización de esta antena se utilizará la herramienta de simulación CST Studio Suite.

Finalmente, se implementará en CST Studio Suite la estructura del arreglo de antenas. Se analizará su efecto en los parámetros radiantes obtenidos en términos de directividad y apuntamiento para conseguir una cobertura azimuth de aproximadamente 180° en el plano de las antenas al activar la operación de una antena a la vez.

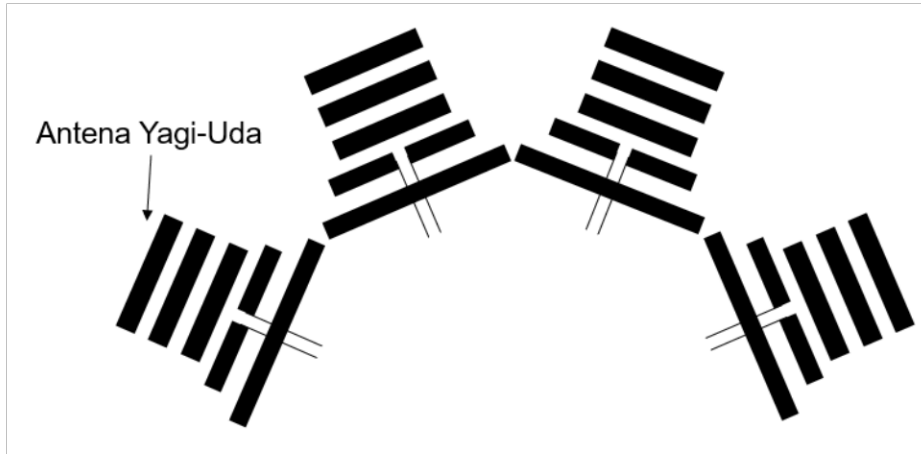


Figura INTRODUCCIÓN.1 Diseño arreglo de antenas Yagi-Uda

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe los conceptos básicos sobre antenas, la antena Yagi-Uda y sus características, arreglos de antenas y brevemente el uso de la técnica *beamforming* a ser implementada en el proyecto propuesto.

1.4.1 TEORÍA BÁSICA DE ANTENAS

Una antena es un dispositivo que permite irradiar o recibir ondas electromagnéticas según el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [8]. Todas las antenas se basan en los principios básicos de la teoría de electromagnetismo de James Clark Maxwell, quién en el año de 1873 publicó su libro llamado “*A Treatise on Electricity and Magnetism*” en donde fundamenta la teoría de electricidad y el magnetismo [9].

La antena forma parte de un sistema formado por tres elementos principales antena transmisora, antena receptora y espacio libre como se muestra en la Figura INTRODUCCIÓN.2. Al momento de propagar las ondas electromagnéticas desde la antena transmisora hacia el espacio libre se producen varios efectos en la Tierra que influyen en la señal para llegar a la antena receptora, todo depende de la configuración del sistema. El principal problema al propagar una onda de radio es la interferencia la cual produce pérdidas en la señal enviada, este fenómeno es involuntario ya que depende de otros factores externos o internos que producen radiación como celulares, radios, televisión, electrodomésticos entre otros.

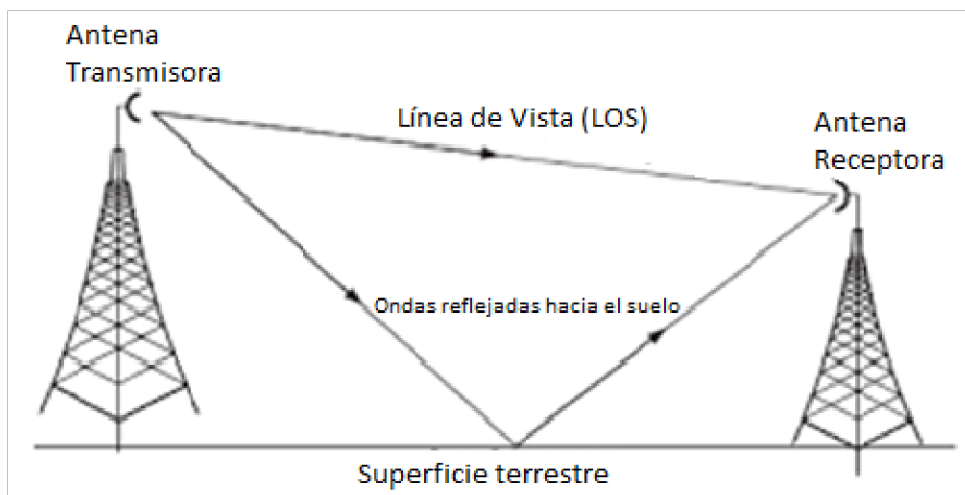


Figura INTRODUCCIÓN.2 Sistema donde forma parte la antena [10]

Una antena creada para las redes 5G también sufre de interferencia por ejemplo cuando un usuario desea obtener conectividad en varios dispositivos inalámbricos simultáneamente, se incrementa la capacidad y el tráfico en la red haciendo que el espectro de radio frecuencia se vaya congestionando [11].

1.4.1.1 PARÁMETROS DE UNA ANTENA

Los parámetros más importantes y básicos de una antena son:

- **Impedancia de entrada** es la relación entre voltaje y corriente, permite que la antena obtenga la mayor potencia radiada.
- **Directividad** permite conocer la potencia radiada por la antena en la dirección de máxima radiación, con este parámetro se puede conocer la direccionalidad de la antena.
- **Ganancia** muestra valores de la potencia entregada a la antena, está relacionada directamente con la directividad.
- **Polarización** indica la orientación del vector campo eléctrico de la antena en un punto fijo del espacio en relación con el tiempo.
- **Ancho de banda** es un rango de frecuencias donde se cumplen las características eléctricas y de radiación de la antena.
- **Patrón de radiación** es un diagrama de las propiedades de radiación de la antena que representa las intensidades de los campos eléctrico y magnético.

1.4.1.2 TIPOS DE ANTENAS

Actualmente, existen varios tipos de antenas para las diferentes necesidades como se menciona en [12], [13], de igual manera depende de su diseño, implementación y su aplicación.

- **Antenas de alambre** usadas comúnmente en aplicaciones para automóviles, barcos, aviones, edificios, casas, etc.
- **Antenas de apertura** diseñadas para aplicaciones en aeronaves y naves espaciales, ya que su cobertura se adapta para estos usos.
- **Antenas Impresas** creadas inicialmente para aplicaciones especiales, hoy en día usadas en aplicaciones gubernamentales y comerciales.
- **Antenas de lentes** basadas en el principio del lente para conformar la radiación que incide sobre ella en una determinada forma, evitando se propague en direcciones no deseadas.
- **Antenas reflectoras** diseñadas para transmitir y recibir señales a grandes distancias, especialmente implementadas en los sistemas de radar y de comunicaciones de microondas.

1.4.2 ANTENA IMPRESA

El desarrollo de estas antenas también conocidas como antenas de parche empezó en la década de 1970 [12] diseñadas a partir de líneas de transmisión. Este tipo de antena consta de un conductor metálico (*patch*) delgado de espesor t superpuesto a un sustrato dieléctrico delgado con un espesor h montado sobre un plano de tierra [8] como se muestra en la Figura INTRODUCCIÓN.3.

Este tipo de antena es una de las más populares debido a la facilidad de análisis y fabricación siendo muy económica al utilizar la tecnología de circuitos impresos, la manera de adaptarse a cualquier ambiente lo hace aún más amigable. Su alta versatilidad para producir grandes patrones de radiación y polarización claro depende del modo de alimentación y el material del elemento conductor [14].

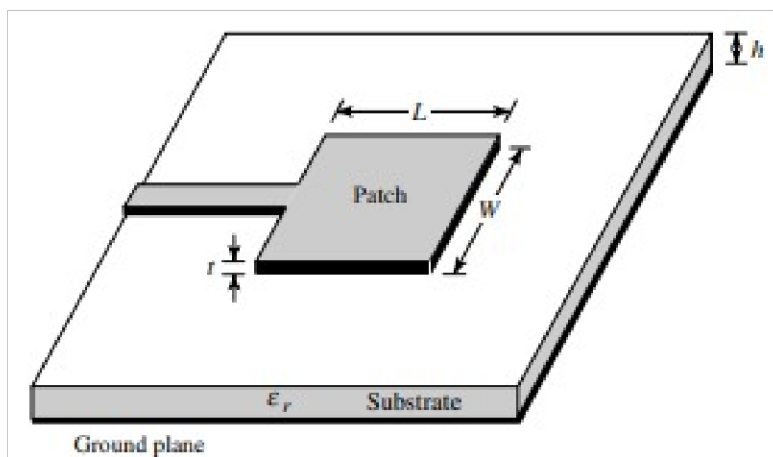


Figura INTRODUCCIÓN.3 Estructura antena impresa [12]

Las desventajas operativas de estas antenas son su baja eficiencia, manejo de baja potencia, ancho de banda limitado, entre otras [12].

El diseño de las antenas *microstrip* depende según el sustrato usado ya que sus constantes dieléctricas (ϵ_r) varían en el rango de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$, y también del espesor del sustrato [15].

El material conductor más usado en estos diseños es el cobre por ser conductor, y en otras aplicaciones es usado de oro. La geometría de este elemento conductor depende de cada diseño de la antena, existen diferentes formas como se observa en la Figura INTRODUCCIÓN.4.

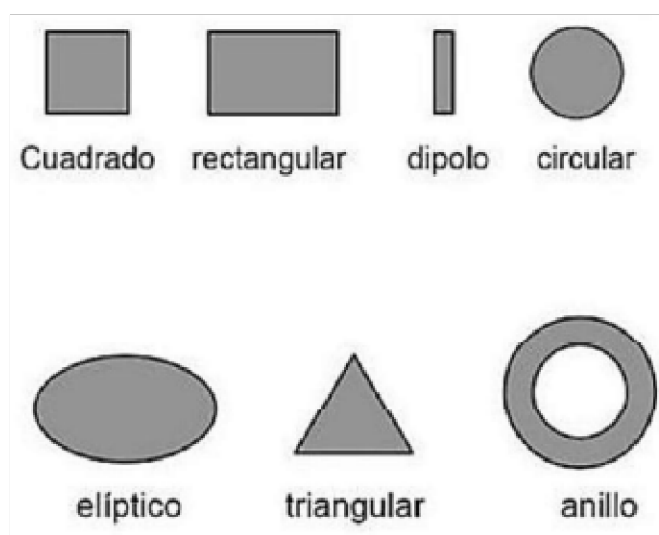


Figura INTRODUCCIÓN.4 Formas de un parche [16]

Algunas aplicaciones donde se implementan las antenas impresas son comunicaciones satélites, telemetría de misiles, sensoramiento remoto, construcción de radiadores biométricos [14], [17].

1.4.3 ARREGLO DE ANTENAS

Algunas aplicaciones no pueden obtener las características de radiación deseadas con un solo elemento radiante [12] se agregan más elementos radiantes que permiten dar un máximo de radiación en una dirección o direcciones en particular obteniendo el efecto deseado. En la Figura INTRODUCCIÓN.5 se muestran algunos ejemplos de arreglos.

Los sistemas de comunicación con aplicaciones más demandantes en radiación son solventados por un arreglo de antenas que está formada de varios elementos que en la mayoría de los casos son idénticos siendo más práctico, más conveniente y simple. Esto permite que el sistema de antenas sea más directivo, es decir entregue ganancias altas, este parámetro también depende de la posición de las antenas ya que su comportamiento se refleja en el patrón de radiación, al agregar más elementos aumenta el tamaño eléctrico del sistema de antenas.

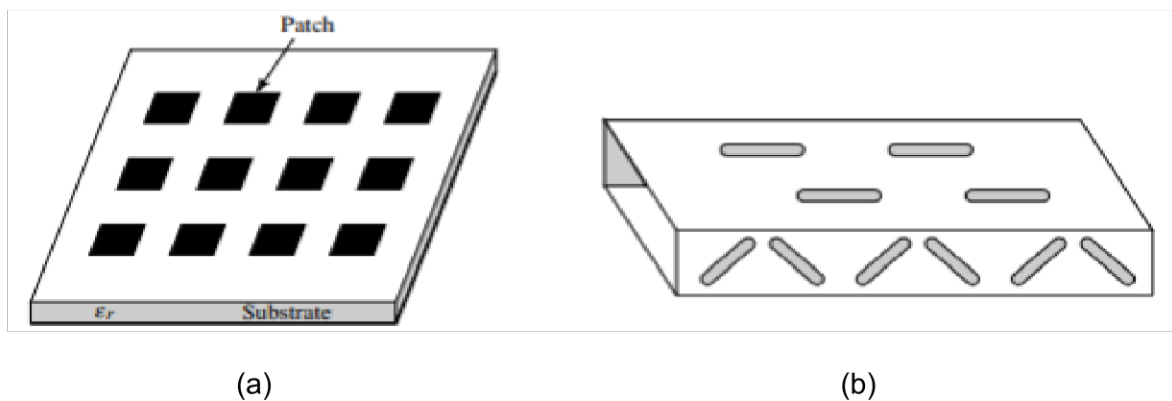


Figura INTRODUCCIÓN.5 Tipos de arreglos de antenas. (a) Arreglo de parches microstrip (b) Arreglo de guía de onda ranurada [12]

Los arreglos de antenas son implementados en aplicaciones como radioastronomía, telecomunicaciones espaciales y satelitales, terrestres y también en radares [12].

1.4.4 ANTENA YAGI-UDA

La antena Yagi-Uda fue desarrollada por H. Yagi y S. Uda en su publicación en inglés “*Proceeding of the Imperial Academy in Japan*” en el año 1926, siendo acreditada y anunciada en el año 1928 con el concepto de antena Yagi-Uda [12]. Como se observa en la Figura INTRODUCCIÓN.6 está compuesta por un dipolo plegado o un dipolo de media longitud de onda, varios directores y un reflector conocidos como elementos parásitos.

El reflector permite que la energía que propaga la antena hacia atrás sea reflejada hacia al frente y los directores permiten obtener mayor directividad y también mayor ganancia.

El dipolo es un elemento activo conectado a la línea de transmisión, su radiación es omnidireccional ya que se propaga en todas las direcciones.

Unos parámetros de referencia de la antena Yagi-Uda son la ganancia y directividad que varía de 2 dB hasta 10 dB dependiendo del número de elementos implementados, se puede tener hasta máximo 20 elementos a la antena Yagi-Uda. La separación entre los elementos directores es típicamente $0,3$ a $0,4 \lambda$.

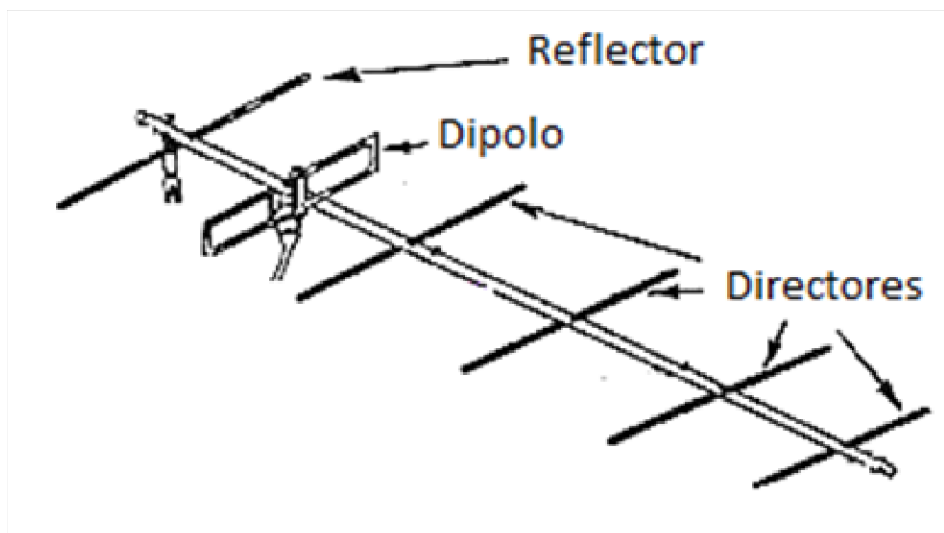


Figura INTRODUCCIÓN.6 Antena Yagi-Uda [18]

En la Figura INTRODUCCIÓN.7 se indica el diagrama de radiación de la antena Yagi-Uda en el plano vertical mostrando como la directividad de esta antena se dirige a una sola dirección, además se observa el lóbulo de mayor radiación conocido como el lóbulo de principal y los demás lóbulos de radiación llamados como lóbulos traseros, mientras que el de mayor amplitud es el lóbulo secundario.

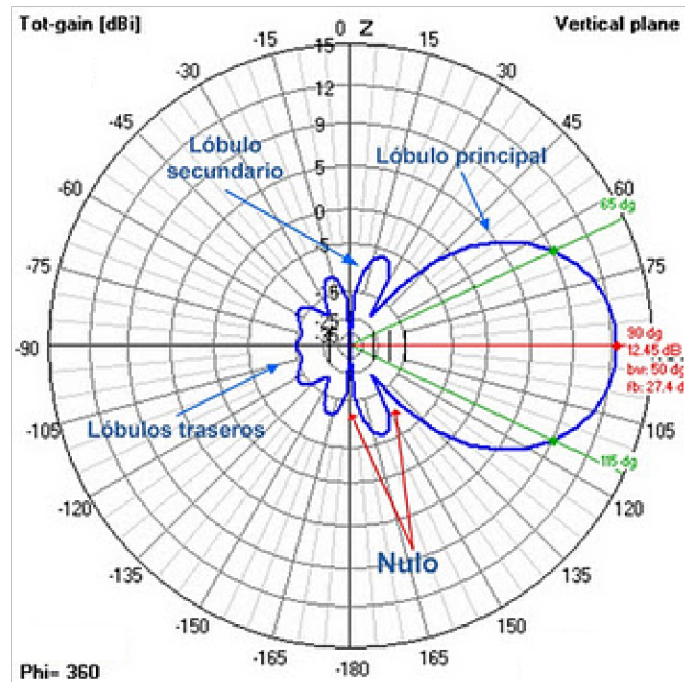


Figura INTRODUCCIÓN.7 Lóbulo de radiación antena Yagi-Uda [19]

El desarrollo del diseño de la antena Yagi-Uda por cálculo matemático [20], mientras que la implementación del tipo de antena Yagi-Uda impresas en sustrato económico (FR4) a frecuencias de operación hasta los 4 GHz se reporta en [21], [22]. También el desarrollo de un arreglo de antenas impresas Yagi-Uda se implementan para aplicaciones WLAN como se menciona en [23].

1.4.5 TÉCNICA BEAMFORMING

La conformación de haces también llamada *beamforming* desea enfocar la energía hacia un receptor. Esta técnica ha sido implementada en las comunicaciones inalámbricas como comunicaciones sonoras [11].

La selectividad espacial con un correcto procesamiento de señales se adapta a esta técnica ya que se desea apuntar toda la radiación a una dirección fija cancelando las señales de interferencia, es decir, obteniendo ganancias en la dirección deseada y anulando en otras [11]. El espacio-tiempo también se puede clasificar como *beamforming* analógico y *beamforming* digital.

Actualmente se desea desarrollar antenas inteligentes con la implementación de esta tecnología *beamforming* como se indica en la Figura INTRODUCCIÓN.8, de esta conformación de haces se desea obtener la mayor radiación posible de cada lóbulo mejorando la recepción de señal, minimizando las interferencias y mejorando la calidad de la señal para que todos los dispositivos deseados por el usuario [6].

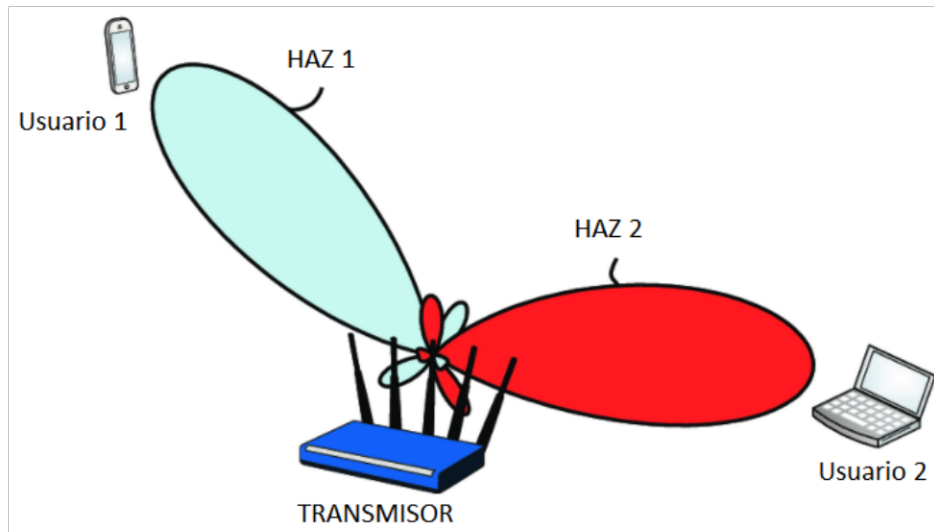


Figura INTRODUCCIÓN.8 Comportamiento de la antena al implementar *beamforming* [24]

La técnica beamforming está siendo implementada en otras aplicaciones como en imagen óptica permitiendo enfocar la luz led en una dirección en particular, exploraciones astrofísicas y geofísicas, detección de objetos en el agua para analizarlos con un fin militar y biomédico evitando la interferencia para mejorar la calidad de la imagen [11].

Con un arreglo de antenas de este tipo Yagi-Uda se desea conmutar varios lóbulos de radiación permitiendo se cubran ciertas zonas angulares por medio del *beamforming*.

La nueva tecnología 5G está innovando mejoras para las aplicaciones que funcionan en ondas milimétricas, impulsando en el estudio de esta técnica implementando en comunicaciones celulares [25], [26].

2 METODOLOGÍA

En el presente proyecto se desarrolla el diseño y simulación de un sistema de antenas impresas Yagi-Uda que implemente la técnica *beamforming* a una frecuencia de operación de 6 GHz. Para esto, se empieza del diseño de un dipolo impreso que trabaje en la frecuencia de operación mencionada, luego se desarrolla una antena Yagi-Uda impresa que resuene a dicha frecuencia, después se adapta un arreglo de cuatro antenas Yagi-Uda impresas y finalmente se optimiza el sistema de antenas para la frecuencia de operación de 6 GHz deseando la cobertura en un ángulo de azimuth de 180 grados para implementar la técnica *beamforming*.

El desarrollo y análisis de los diferentes diseños propuestos son simulados con la herramienta de simulación CST Studio Suite, la cual permite elegir el mejor diseño que se adapte a los objetivos deseados en función de los resultados obtenidos.

2.1 CST STUDIO SUITE

CST Studio Suite es un software de análisis de onda completa para estructuras de radiofrecuencia. En el campo de las antenas, esta herramienta permite la simulación de los campos y ondas electromagnéticas de un elemento radiante. Su uso es muy amigable y flexible para aplicaciones de todo el espectro electromagnético [27].

La variedad de solucionadores que ofrece este software depende de la aplicación de la antena a ser diseñada, estos se mencionan a continuación: alta frecuencia, baja frecuencia, partículas y módulo PCB para el análisis de compatibilidad electromagnética (EMC) y mazos de cable, para el presente proyecto se usa el solucionador de alta frecuencia.

2.1.1 DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Siendo un simulador de onda completa basado en el método de elementos finitos, éste ofrece un excelente rendimiento de simulación para sistemas de múltiples puertos, como conectores y arreglos permitiendo calcular todos los puertos al mismo tiempo.

2.1.2 OPTIMIZACIÓN AUTOMÁTICA

El software al momento de diseñar la antena permite parametrizar las propiedades de los materiales implicados en el diseño y su estructura, con esto, es posible el estudio del comportamiento de la antena en términos tanto circuitales como radiantes a medida que cambian sus propiedades. Este simulador permite optimizar el rendimiento del dispositivo creado e identificar los problemas en el proceso del diseño para evitar costos y fallos antes de su implementación.

2.1.3 MANIPULACIÓN DE CST STUDIO SUITE

En esta sección se presenta la configuración adecuada para las simulaciones en el software CST Studio Suite que permite disminuir los recursos del sistema y los tiempos de simulación de los diferentes diseños creados en este trabajo.

En primer lugar, se crea un proyecto eligiendo la librería *MW&RF&Optical* eligiendo en el área de *Antennas* como se indica en la Figura METODOLOGÍA.9.

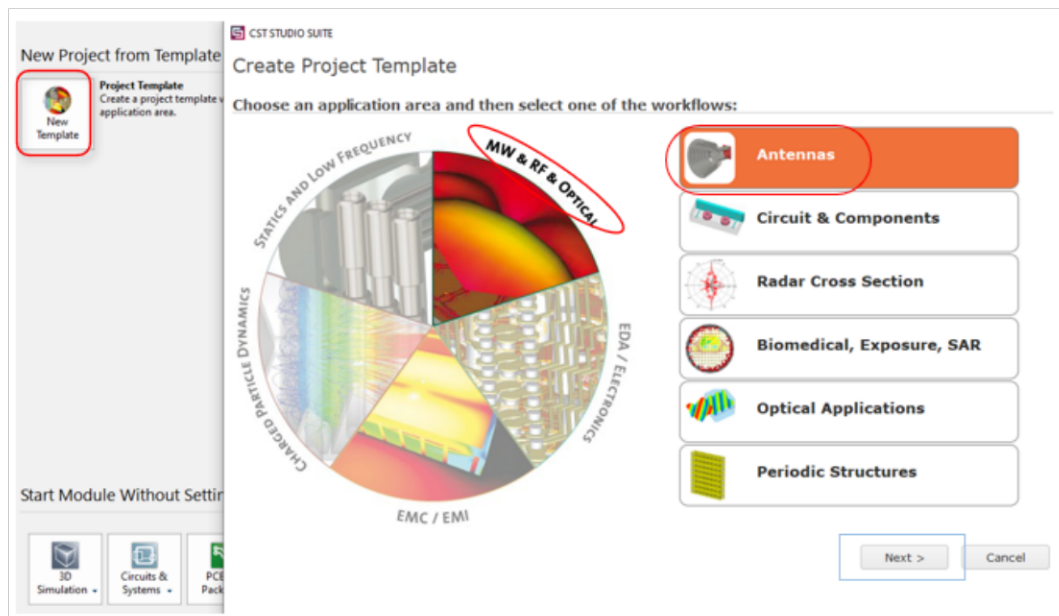


Figura METODOLOGÍA.9 Creación de un proyecto

Luego se abre una selección del tipo de antena como muestra la Figura METODOLOGÍA.10, por ello se escoge *Planar (Patch, Slot, etc)*.

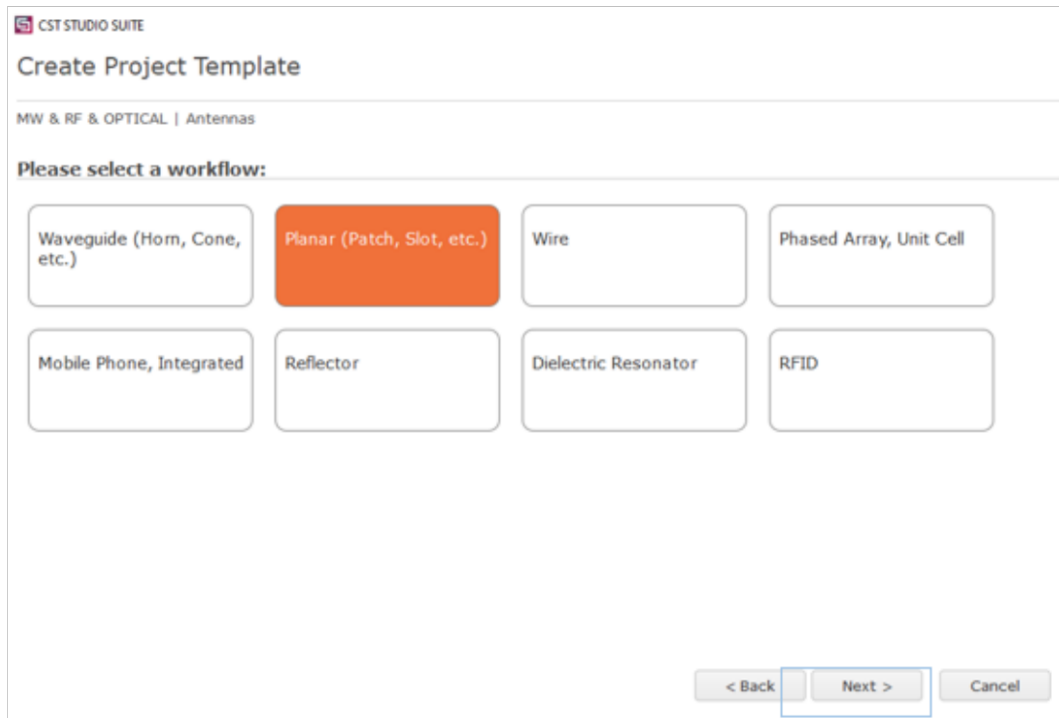


Figura METODOLOGÍA.10 Selección del tipo de antena

Para su análisis se trabaja en el dominio de la frecuencia para tener mayor precisión, por ello se selecciona *Frequency Domain Solver* como indica en la Figura METODOLOGÍA.11.

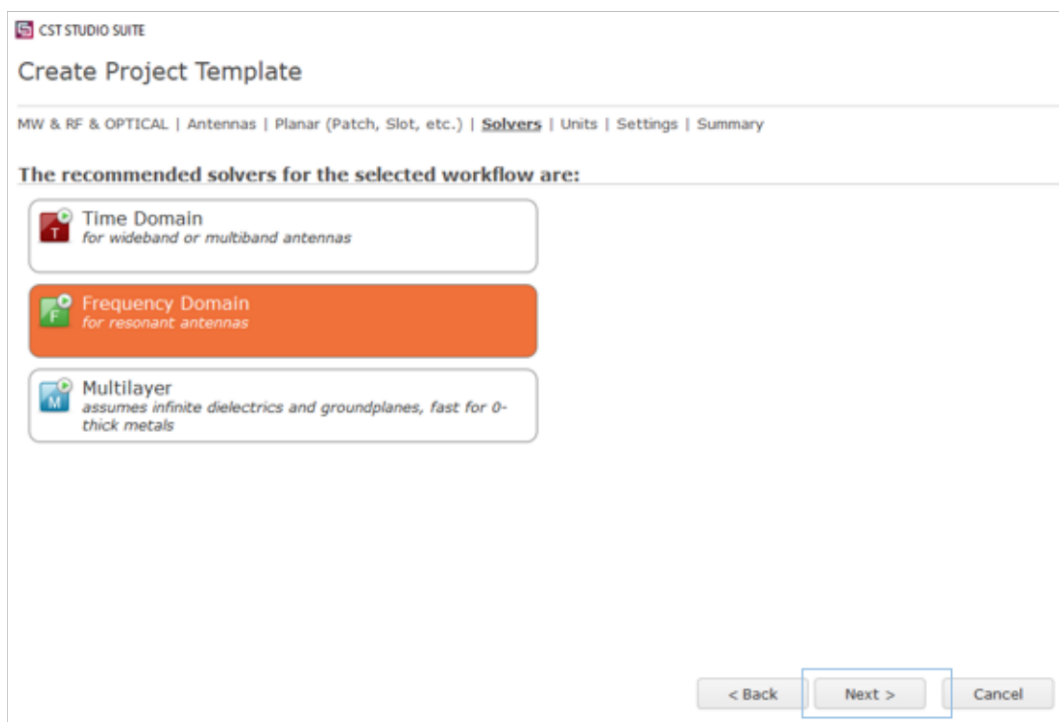


Figura METODOLOGÍA.11 Selección del solucionador para el proyecto

En la Figura METODOLOGÍA.12 se elige las unidades de medida con las que se trabaja dependiendo del proyecto, en este caso están definidas en *mm* y *GHz*.

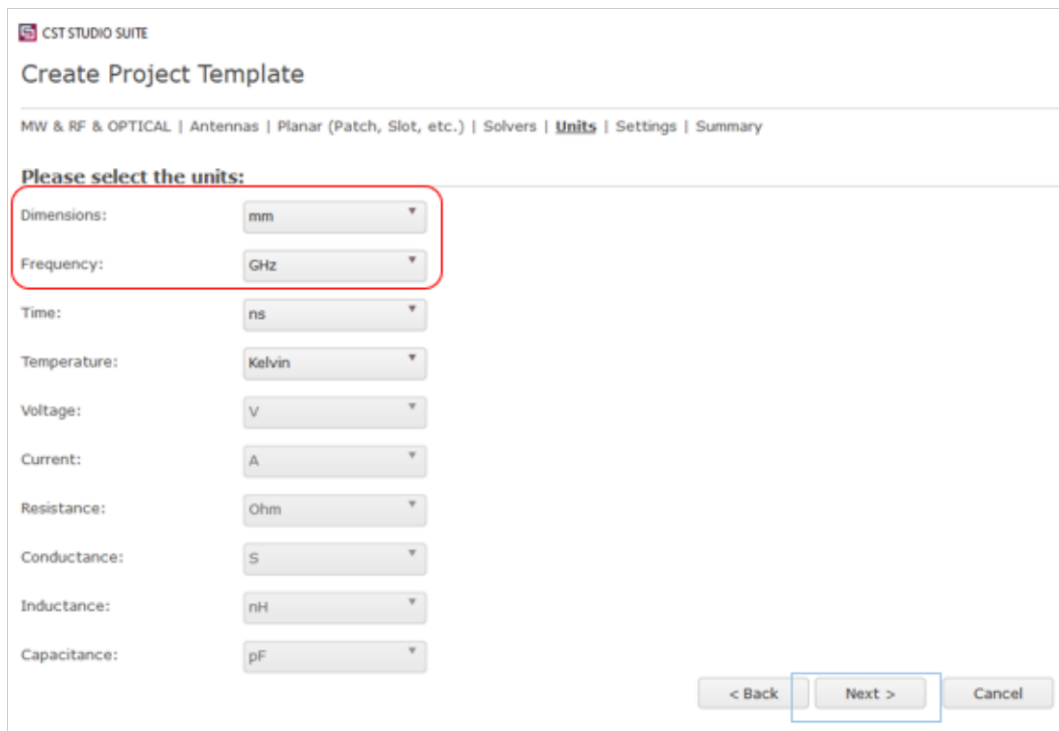


Figura METODOLOGÍA.12 Selección de unidades de medida

A continuación, se elige la frecuencia de operación del proyecto y se activa los monitores que se requiera ver en la simulación como se muestra en la Figura METODOLOGÍA.13.

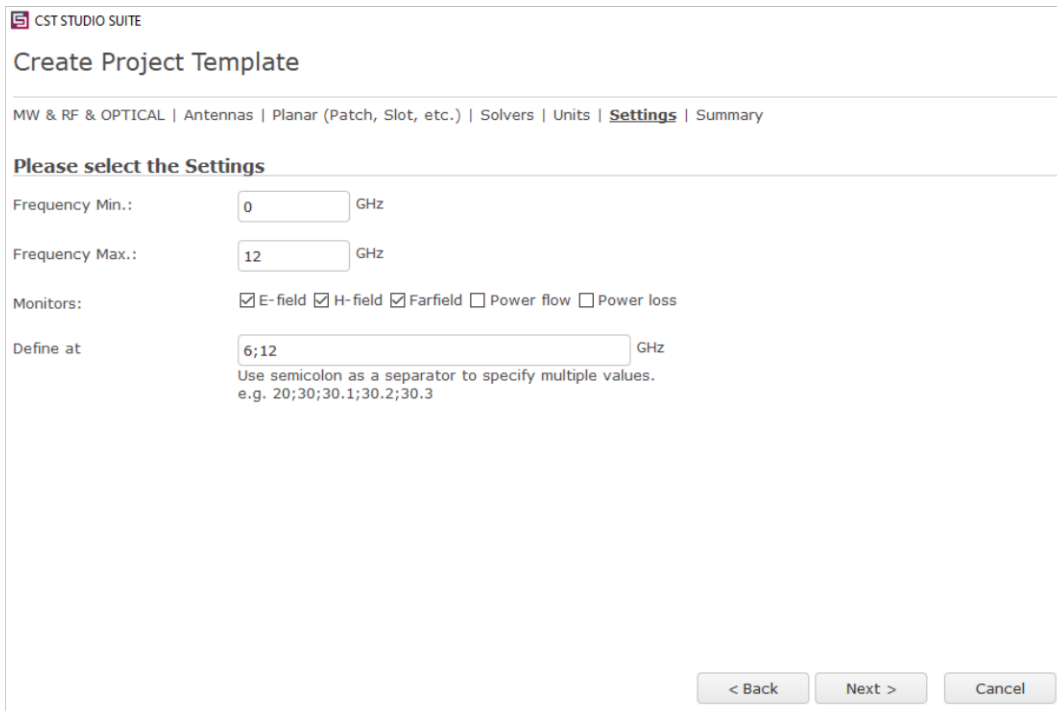


Figura METODOLOGÍA.13 Selección de configuración de la frecuencia y monitores

Para finalizar la configuración inicial se coloca un nombre al proyecto como indica la Figura METODOLOGÍA.14.

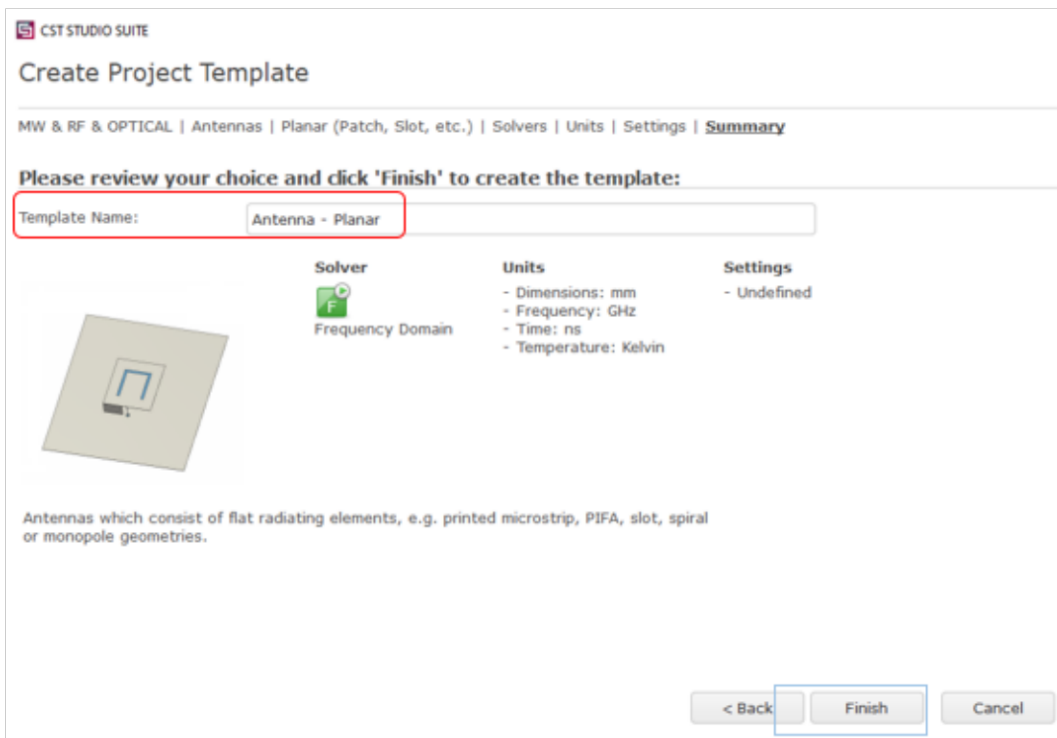


Figura METODOLOGÍA.14 Selección de un nombre al proyecto

Se edita las condiciones de frontera para tener todo el contorno radiante de la estructura en la sección *Simulation*→*Boundary*→*Boundaries*, fijando tipo “open” como se indica en la Figura METODOLOGÍA.15.

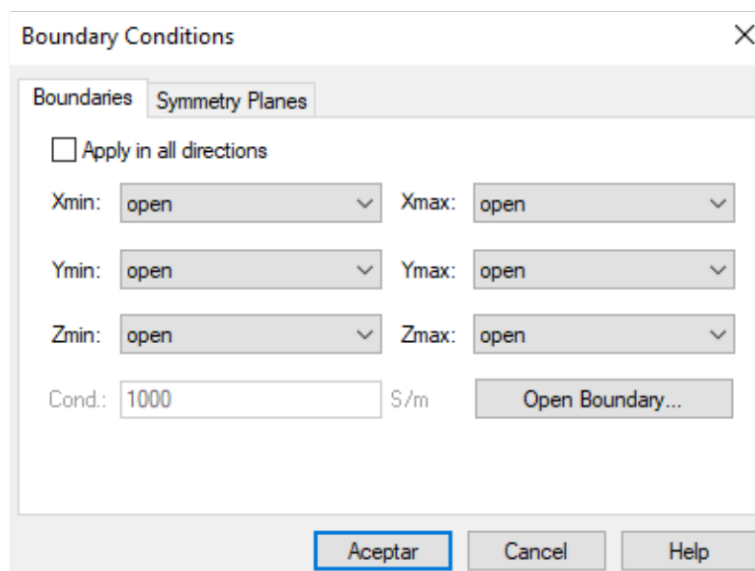


Figura METODOLOGÍA.15 Configuración del entorno de simulación

Finalmente, con respecto al espacio de circundante alrededor de la estructura se establece un espacio igual a $\lambda/2$ a la frecuencia central de simulación. En primer lugar, estableciendo una variable llamada “lambda” que se calcula como la longitud de onda a la frecuencia de operación, se edita en la pestaña *Simulation*→*BackgroundProperties* como se muestra en la Figura METODOLOGÍA.16.

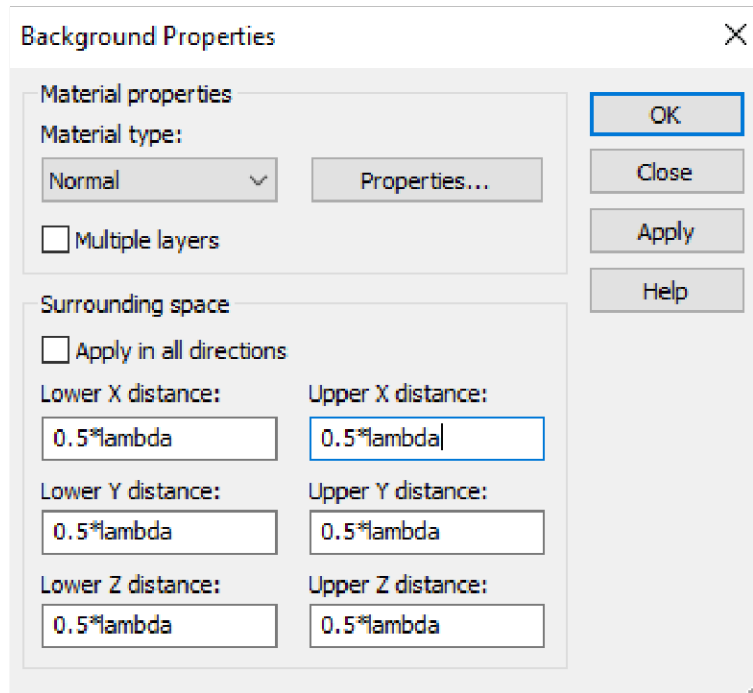


Figura METODOLOGÍA.16 Propiedades del espacio circundante para las simulaciones

Estos parámetros mencionados anteriormente son considerados en todos los diseños de este proyecto. Mientras que la simetría de planos depende de cada diseño simulado, esto se indicará en cada análisis.

2.2 ANTENA DIPOLO

La Figura METODOLOGÍA.17 muestra la implementación de la antena dipolo de media longitud de onda realizada con tecnología impresa (cobre sobre substrato FR4). El dipolo tiene en su mitad geométrica una ranura (*gap*) de $s = 1$ mm en donde se excita por medio de un puerto discreto diferencial de impedancia 75Ω . Para una frecuencia de operación de 6 GHz, la longitud de onda en el espacio libre es de 50 mm, entonces, la longitud de la estructura dipolo de media longitud de onda resulta $L = 25$ mm. El ancho de las tiras de cobre se ha determinado en $w = 3,2$ mm, esto con el fin de facilitar, en una futura implementación práctica, la manufactura de la estructura.

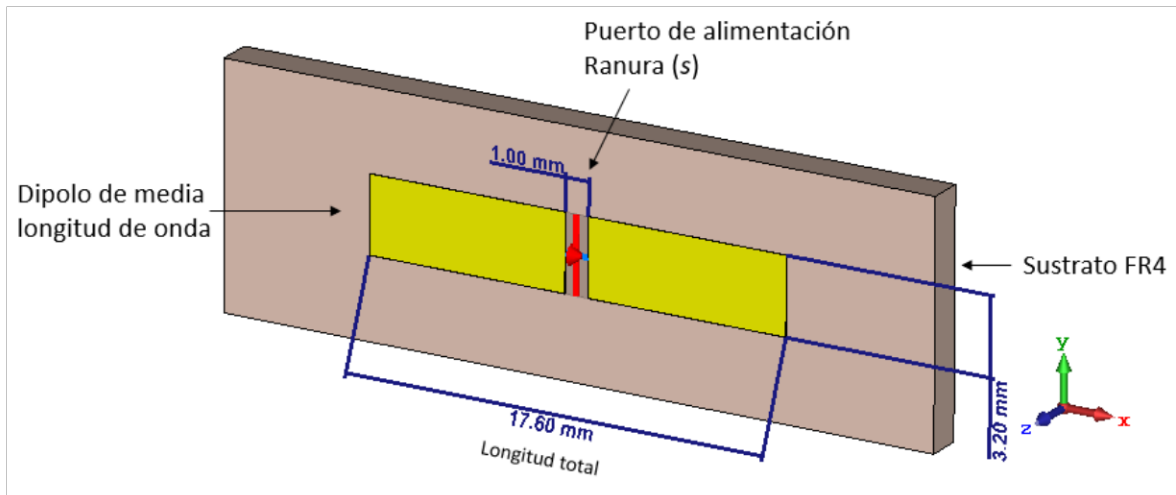


Figura METODOLOGÍA.17 Estructura del dipolo $\lambda/2$ impreso modelada en CST Studio Suite

Con el fin de optimizar los recursos de simulación, para este diseño en CST Studio Suite se configuran los planos de simetría en la pestaña *Simulation* \rightarrow *Boundary* \rightarrow *Symmetry Planes* como se muestra en la Figura METODOLOGÍA.18. Acorde a la estructura presentada en el plano YZ se establece una simetría eléctrica y en el plano XZ una simetría magnética.

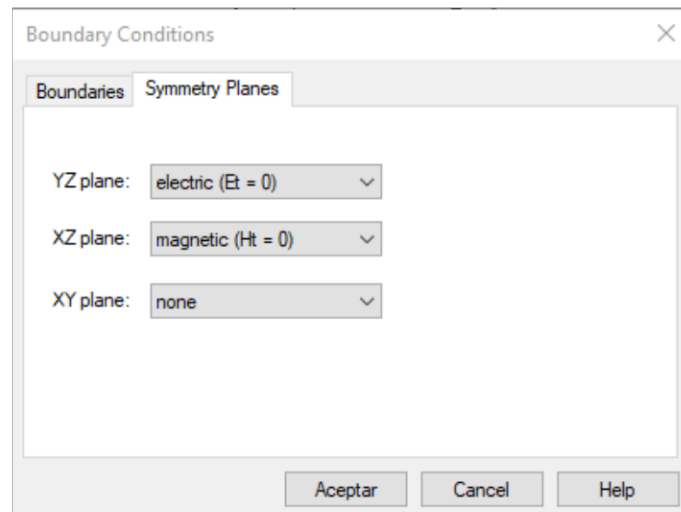


Figura METODOLOGÍA.18 Configuración de los planos de simetría para la estructura dipolo $\lambda/2$ impreso

Para el presente diseño se utilizan diferentes materiales para el modelamiento de la estructura. La antena impresa como tal se modela con cobre recocido y el sustrato se modela con un sustrato de fibra de vidrio FR4, cuya hoja de datos se la encuentra en el Anexo I. Se ha elegido este tipo de sustrato ya que es el más utilizado en este tipo de

aplicaciones por su bajo costo y adecuadas características mecánicas y eléctricas acordes a las necesidades del proyecto [22].

Para la configuración de la simulación de la estructura se toman en cuenta los parámetros de los materiales utilizados los cuales se detallan en la Tabla METODOLOGÍA.1.

Tabla METODOLOGÍA.1 Parámetros de los materiales utilizados para la simulación en CST Studio Suite de la estructura dipolo impreso

FR4 con pérdidas	
Constante dieléctrica (ϵ_r)	4,4
Espesor de sustrato (h)	1,5 mm
Tangente de pérdidas ($\tan \delta$)	0,02
Cobre recocido	
Espesor de la capa de cobre (t)	17 μm
Conductividad (σ)	15 MS/m

En el análisis del parámetro S_{11} de la antena simulada se obtiene la resonancia a una frecuencia diferente a la deseada (alrededor de 4,5 GHz con un $S_{11} = -23,44$ dB), por ello se realiza un proceso de optimización del dipolo impreso que consiste en la variación de su longitud con el objetivo de alcanzar una resonancia a la frecuencia de 6 GHz. Resultado de este proceso de optimización es una longitud total del dipolo ($L + s$) de 17,6 mm. La Figura METODOLOGÍA.19 muestra el parámetro de reflexión obtenido en la simulación tanto para la estructura inicial como para la estructura optimizada la cual presenta una resonancia a 6 GHz con un $S_{11} = -55,78$ dB.

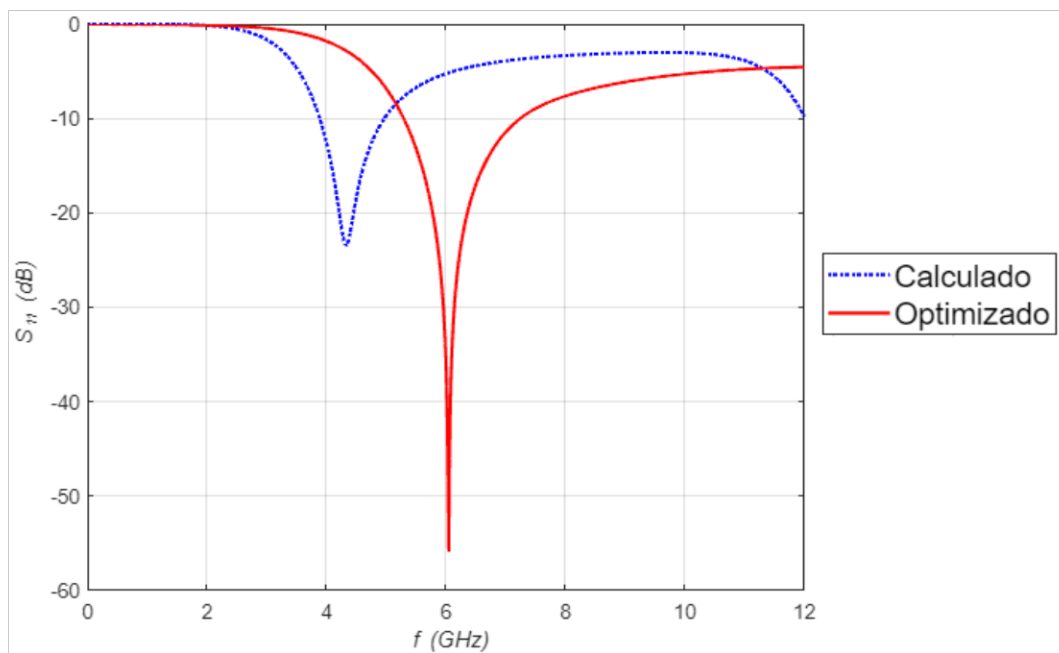
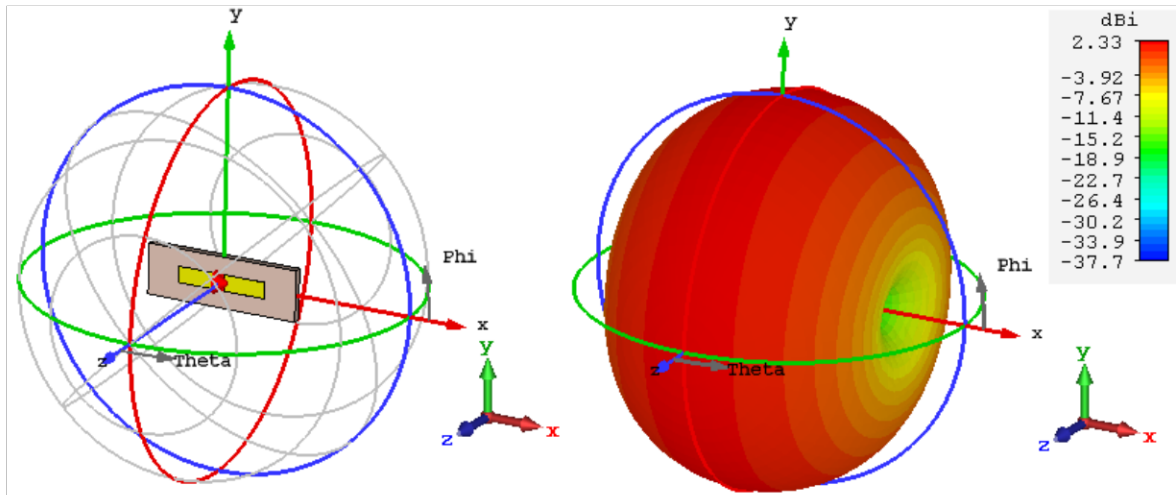
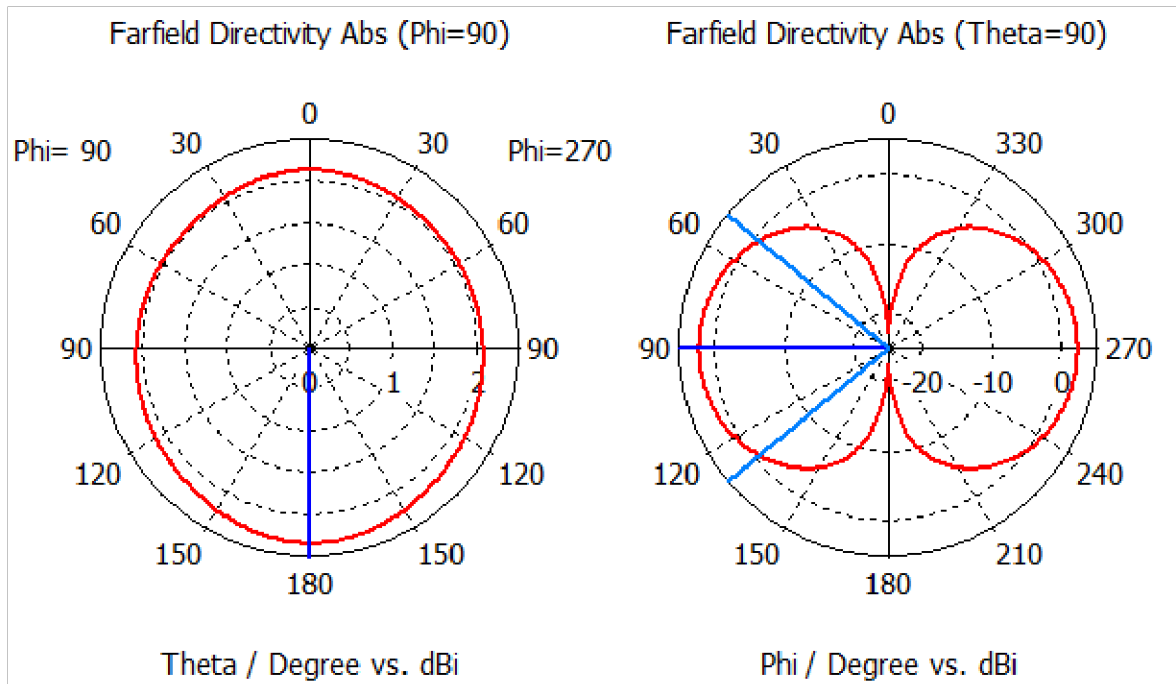


Figura METODOLOGÍA.19 Parámetro S_{11} simulado de los dipolos impresos implementados

La Figura METODOLOGÍA.20 muestra el diagrama de radiación de la estructura optimizada. Se puede apreciar que la directividad de la antenna es 2,33 dBi. Este resultado es próximo al valor teórico de 2,16 dBi exhibiendo un error de 0,17 dB el cual se considera como aceptable (3,83% de error). Asimismo, de manera cualitativa, se aprecia que el plano E de la antenna es bidireccional mientras que el plano H es omnidireccional. Estos diagramas, de igual manera, responden a lo esperado en una estructura tipo dipolo de media longitud de onda.



(a)



(b)

(c)

Figura METODOLOGÍA.20 Resultado de la antena optimizada con (a) diagrama tridimensional, (b) plano H, (c) plano E.

2.3 ANTENA YAGI-UDA IMPRESA

Para el diseño de la antena Yagi-Uda se toma como referencia las tablas de dimensionamiento (ANEXO I) y flujo de trabajo propuesto en [12]. Con el fin de cumplir con el objetivo del presente trabajo, el cual indica la realización de una estructura manejable con técnicas de *beamforming* para una cobertura en un ángulo de azimuth de 180° , se escoge la realización de aquel diseño que entregue una directividad relativamente baja y que cuya estructura permita algunos grados de libertad para su optimización.

Bajo las consideraciones planteadas se escoge el diseño de una antena Yagi-Uda con una directividad de 9,2 dBd 11,36 dBi la cual está compuesta por un reflector y tres directores. Con este tipo de antena se espera que el ángulo de media potencia sea de aproximadamente 55° (basando el cálculo en la fórmula aproximada propuesta por Kraus en [12]) y así, con cuatro antenas similares posicionadas para un sector angular del plano de azimuth, cubrir los 180° de cobertura. Adicional, el hecho de presentar tres directores permitirá la manipulación de su geometría (longitudes y espaciamiento de los directores, supresión o inclusión de elementos pasivos) para conseguir un objetivo tanto circuital como radiante.

La Tabla METODOLOGÍA.2 resume las dimensiones que se toman como iniciales para el modelado de la antena Yagi-Uda.

Tabla METODOLOGÍA.2 Dimensionamiento Antenas Yagi-Uda por tablas [12]

Longitud del Reflector, λ		0,482
Longitud de los Directores, λ	1st	0,428
	2nd	0,424
	3rd	0,428
Espaciamento entre Directores, en λ		0,2

La Figura METODOLOGÍA.21 muestra la estructura inicial de la antena Yagi-Uda.

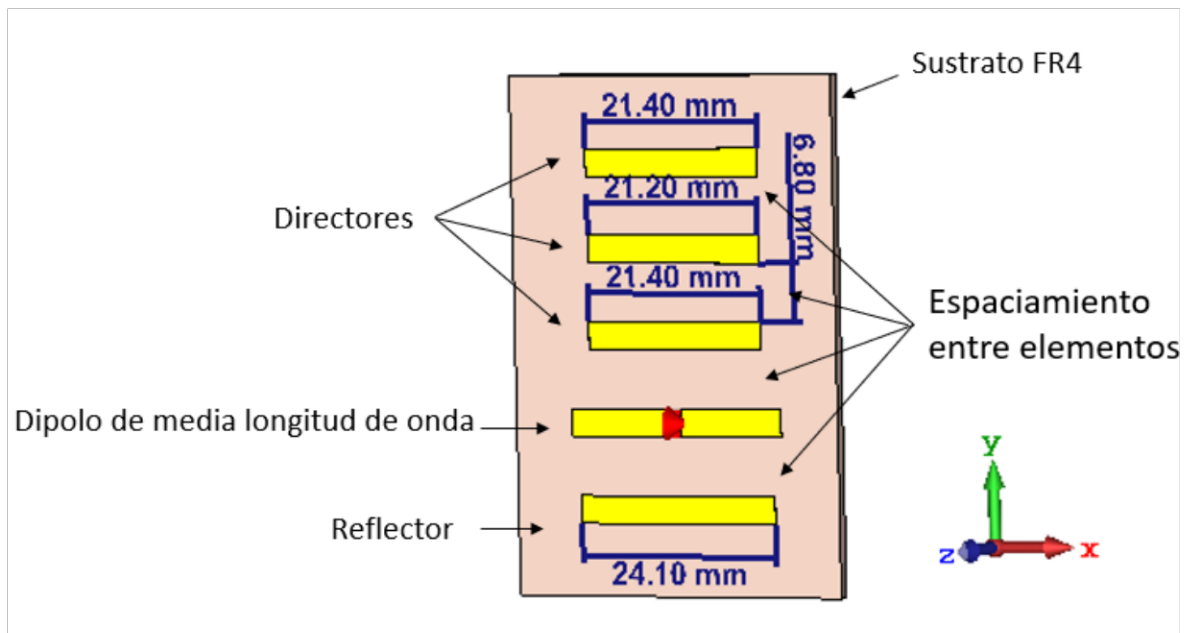


Figura METODOLOGÍA.21 Estructura inicial de la antena Yagi-Uda impresa propuesta

La configuración del plano de simetría para este diseño es diferente. La Figura METODOLOGÍA.22 muestra la nueva configuración. Nótese que se ha eliminado la simetría magnética la cual no existe al ser la antena unidireccional (con cierto grado de tolerancia en la relación delante-atrás).

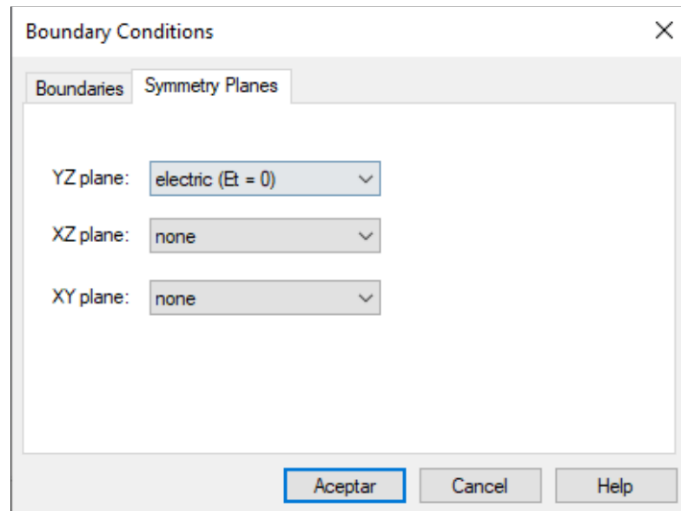


Figura METODOLOGÍA.22 Configuración de los planos de simetría para la estructura Yagi-Uda impresa

La Figura METODOLOGÍA.23 muestra el parámetro S_{11} simulado de la estructura inicial modelada con las dimensiones dadas en la Tabla METODOLOGÍA.2. Se puede apreciar que el resultado obtenido indicando una resonancia con $S_{11} = -5,9$ dB a una frecuencia de 4 GHz (con alguna resonancia acoplada en su frecuencia vecina superior).

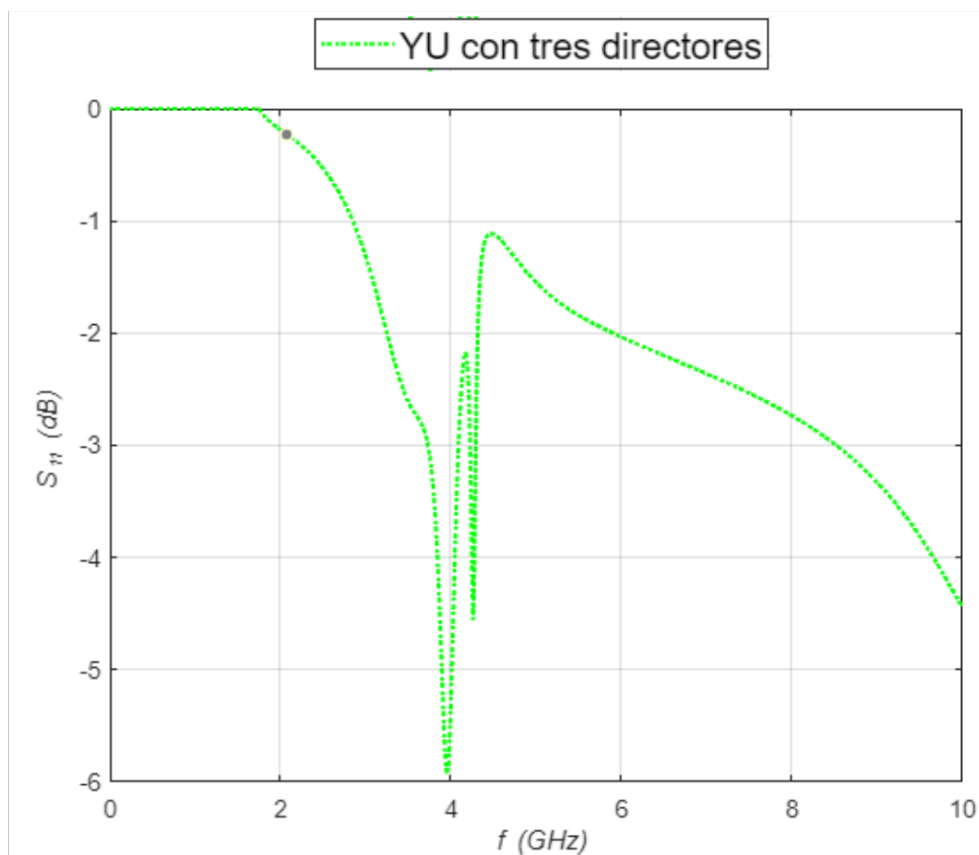


Figura METODOLOGÍA.23 Parámetro S_{11} de la estructura inicial de antena Yagi-Uda

El resultado obtenido obliga entonces a realizar un proceso de optimización exhaustivo en el cual se oriente en primer lugar a la obtención de la resonancia a la frecuencia de operación objetivo para posteriormente conseguir las características de radiación deseadas.

Para el efecto se realizaron varias simulaciones de manera metódica, en las cuales se estudiaba el efecto de la variación de un parámetro para proseguir con la modificación de otro. Para este proceso se tomó como referencia lo descrito en [14] donde indica que la longitud del reflector puede estar entre 5% y 10% en exceso de la longitud del elemento dipolo $\lambda/2$ impreso y lo descrito en [28] que indica que los directores varían en una longitud mayor entre $0,25 \lambda$ y $0,42 \lambda$.

La Figura METODOLOGÍA.24 muestra la estructura final optimizada de la antena Yagi-Uda la cual, para conseguir el objetivo planteado, consta ahora de dos directores únicamente.

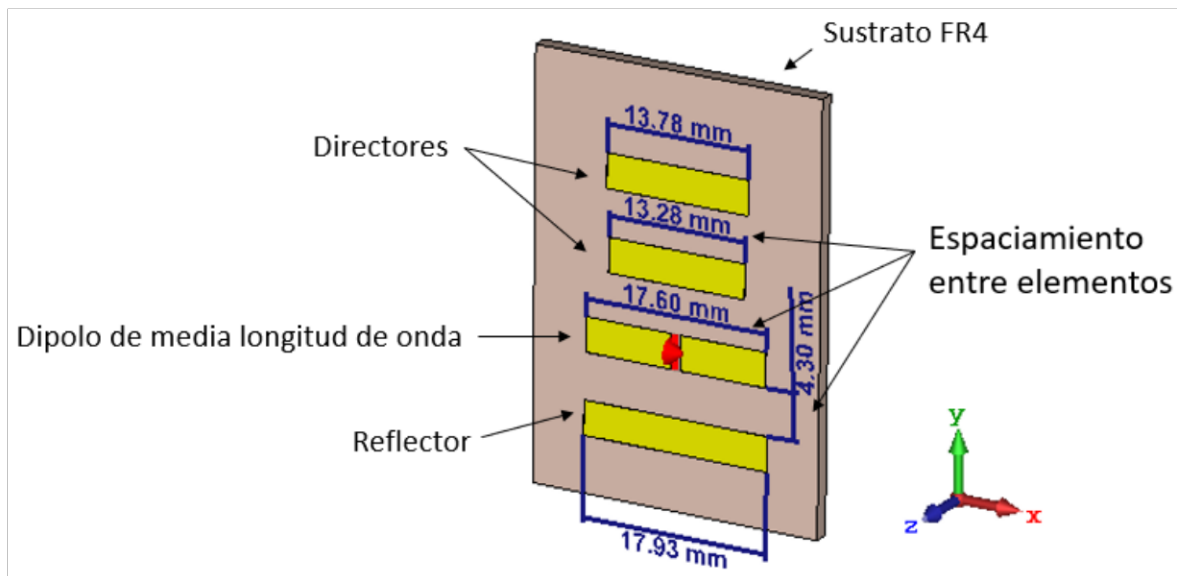


Figura METODOLOGÍA.24 Estructura Yagi-Uda optimizada

La Tabla METODOLOGÍA.3 enlista los valores optimizados de los parámetros de diseño para la antena Yagi-Uda impresa y la Figura METODOLOGÍA.25 ilustra el parámetro S_{11} obtenido en la simulación en la cual se aprecia que la resonancia ahora está localizada a la frecuencia de 6 GHz con un $S_{11} = -16,89$ dB.

Tabla METODOLOGÍA.3 Dimensionamiento Antena Yagi-Uda optimizada

Longitud del Reflector, λ		0,332
Longitud de los Directores, λ	1st	0,266
	2nd	0,276
Espaciamiento entre Directores, en λ		0,15

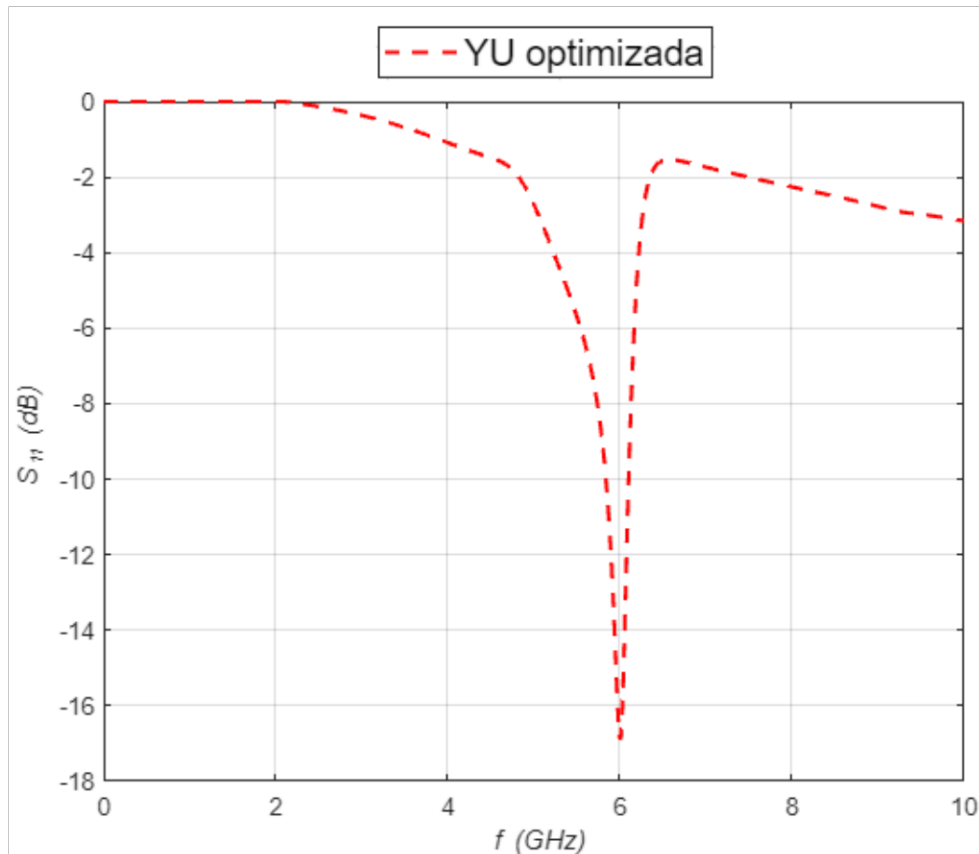
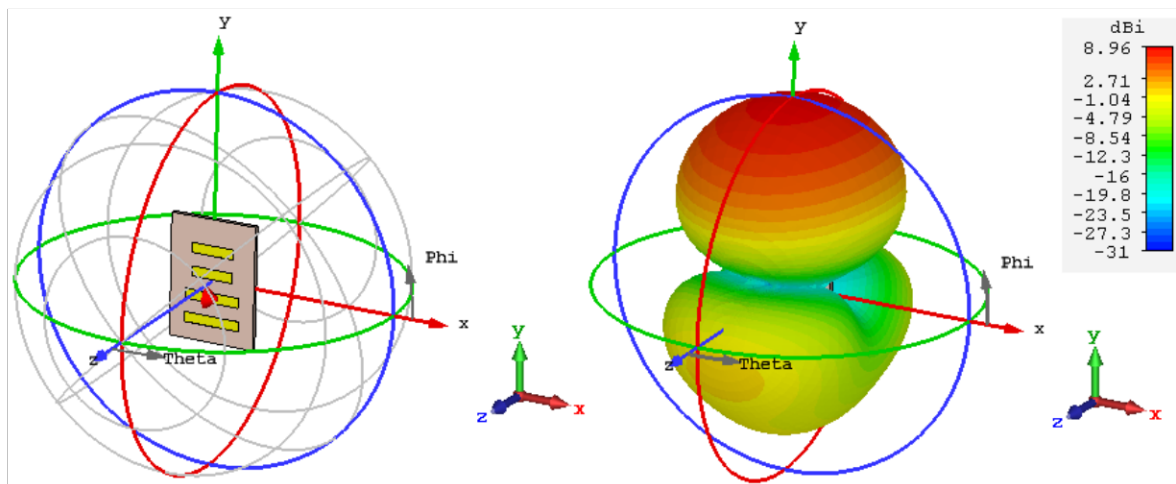
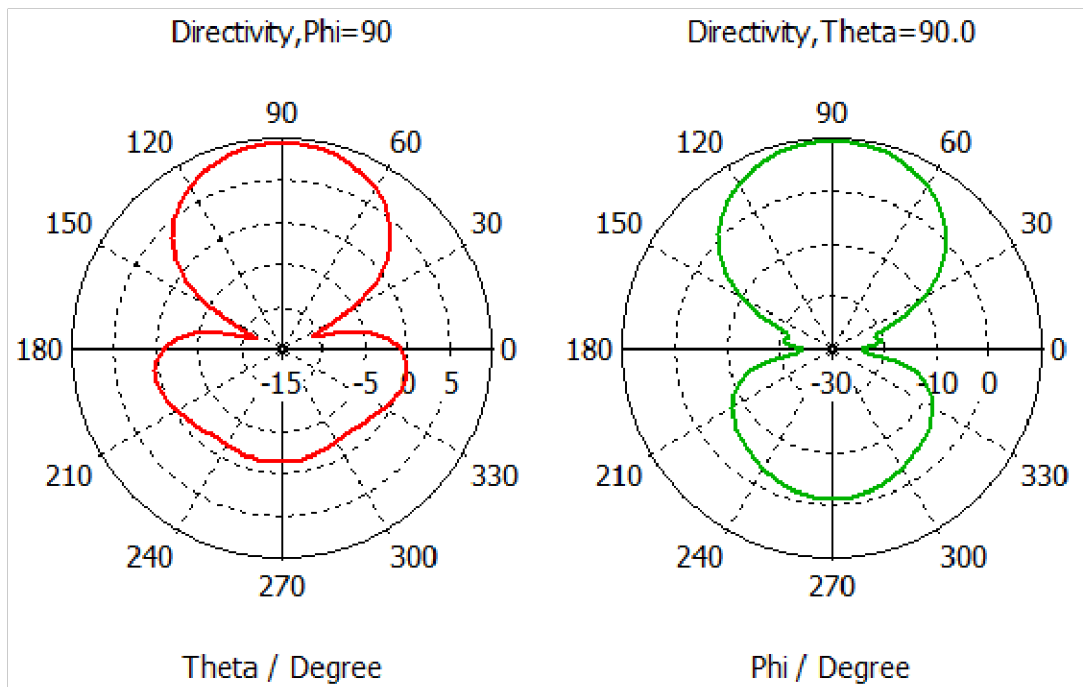


Figura METODOLOGÍA.25 Parámetro S_{11} del diseño Yagi-Uda optimizado

A continuación, se observa en la Figura METODOLOGÍA.26 el diagrama de radiación de la antena Yagi-Uda optimizada. Se puede apreciar una directividad de la antena de 9,41 dBi. Este resultado es esperado ya que se ha reducido un director por lo que el valor de la directividad debía ser menor que 11,36 dBi. Asimismo, de manera cualitativa, en el plano E y plano H se aprecia la máxima radiación con una directividad a los 90° . Estos diagramas, de igual manera, responden a lo esperado en una estructura tipo Yagi-Uda con respecto a la relación delante-atrás.



(a)



(b)

(c)

Figura METODOLOGÍA.26 Resultado de la antena Yagi-Uda optimizada con (a) diagrama tridimensional, (b) plano H, (c) plano E.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el diseño y simulación se elimina la configuración de los planos de simetría como se indica en la Figura RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.27. Debido a que en el arreglo de antenas Yagi-Uda impresas no existe simetría en los planos.

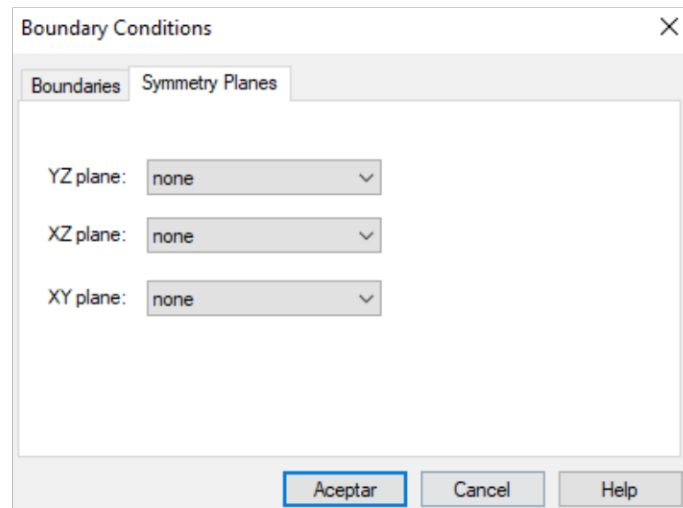


Figura RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.27 Desactivación de los planos de simetría para el arreglo de antenas

Esta sección muestra los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, conclusiones y recomendaciones necesarias.

3.1 RESULTADOS

Una vez logrado el diseño de la antena Yagi-Uda impresa para la frecuencia de 6 GHz se implementa el arreglo de cuatro antenas Yagi-Uda con el fin de cubrir 180 grados de cobertura para usar la técnica *beamforming* como se muestra en la Figura RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.28.

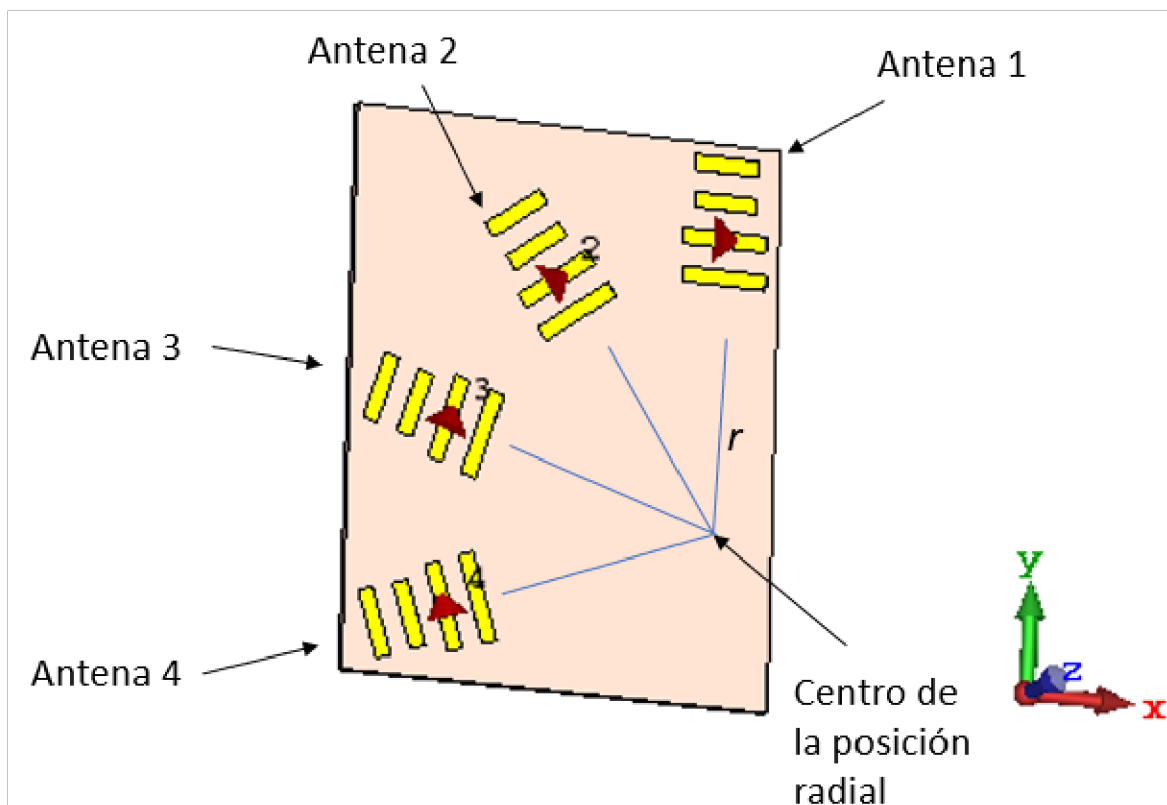


Figura RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.28 Estructura de antenas Yagi-Uda impresas

En el análisis de cobertura del campo de radiación se desea cubrir los 180° para el uso de la técnica *beamforming* por ello se varía la distancia entre las antenas evitando que el campo radiado de cada antena influya en la otra y altere sus características radiantes.

El proceso de optimización de la posición de las cuatro antenas entonces modifica el parámetro de posición radial r y observa que tanto la directividad como la adaptación (parámetro S_{11}) de cada antena no se vea afectada significativamente. La Tabla RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.4 resume la posición angular de cada antena y los valores de directividad obtenidos al accionar una antena a la vez para una posición radial de 60 mm:

Tabla RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.4 Posición angular de cada antena y directividad individual para una posición radial de 60 mm

Número de antena	Posición angular	Directividad
Antena 1	36°	9,30 dBi
Antena 2	72°	9,52 dBi
Antena 3	108°	9,18 dBi
Antena 4	144°	9,21 dBi

Sabiendo que la directividad de la antena Yagi-Uda impresa optimizada presentada en la sección 2.3 es de 9,41 dBi y en la estructura de antenas este valor se ha alterado a un máximo de 9,52 dBi, el margen de error es mínimo. Con ello se analiza la cobertura azimuth permitida por este arreglo de antenas tomando en cuenta los ángulos de media potencia periféricos de las antenas 1 y 4 en la Figura RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.29 se aprecia que la cobertura bajo esta consideración es de 161,98°.

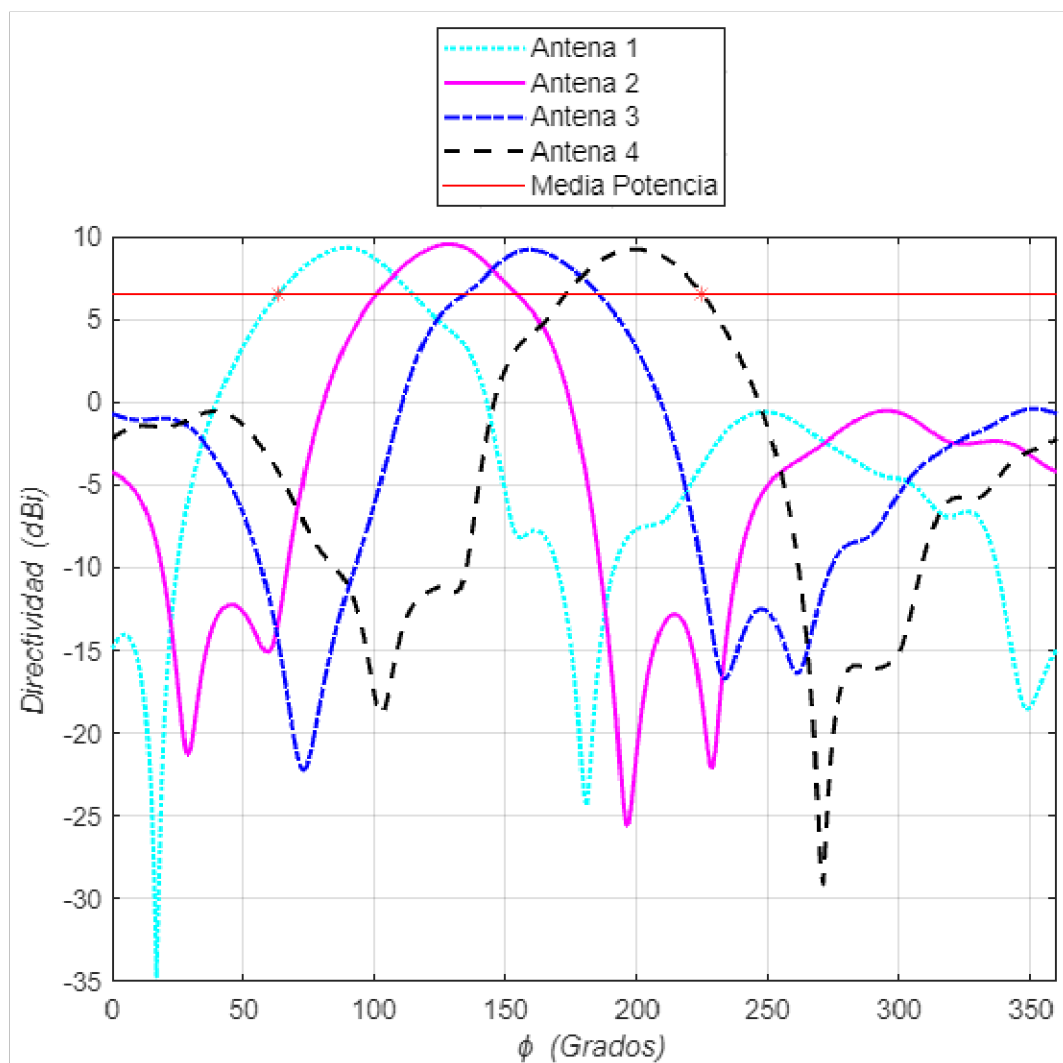


Figura RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.29 Diagramas de radiación de las cuatro antenas que conforman la estructura

3.2 CONCLUSIONES

Se diseñó y simuló una antena dipolo de media longitud de onda impresa para la frecuencia de operación de 6 GHz en el simulador CST Studio Suite, este diseño se implementó en cobre sobre un sustrato FR4 alimentado por un puerto discreto diferencial de 75 Ω , una vez simulado la frecuencia de resonancia estaba cerca a los 4,5 GHz, por

ello se optimizó el dipolo de media longitud de onda obteniendo una longitud total de 17,60 mm con $S_{11} = -55,78$ dB con una directividad de 2,33 dBi para la frecuencia deseada.

Se comenzó a diseñar la antena Yagi-Uda impresa por el método de tablas basado en un reflector y tres directores, analizando lo simulado mostraba un campo de radiación similar a un dipolo ideal siendo casi omnidireccional, razón por la que se optimizó mediante análisis experimental comenzando del dipolo de media longitud de onda impreso ya optimizado, a este diseño se agregó un reflector y dos directores, estos elementos parásitos separados por $0,15 \lambda$ obteniendo una directividad de 9,41 dBi.

El desarrollo del sistema de antenas se implementó por cuatro antenas Yagi-Uda impresa trabajando a la frecuencia deseada, se simuló a diferentes posiciones radiales para su análisis, donde se observó que al aumentar el valor del parámetro posición radial existen mínimas perturbaciones en el campo de radiación de cada antena Yagi-Uda, se comprobó en el análisis del parámetro S_{11} de cada antena, en cambio al disminuir el valor del parámetro posición radial lo que se obtuvo es solapamiento en los campos de radiación de cada antena desaprovechando la característica relevante de directividad de la antena Yagi-Uda, en los diagramas de radiación de cada antena se observó deformidades en el lóbulo principal. Todo este análisis se realizó con el fin de lograr una cobertura de un ángulo de azimuth de 180° si bien no es 100% lo esperado, este diseño de arreglo de antenas se puede mejorar para mencionada cobertura.

Para cada simulación se realizó una configuración previa según el diseño en los planos de simetría, se analizó cada diseño en el dominio de la frecuencia para obtener valores reales.

3.3 RECOMENDACIONES

Luego de realizar las respectivas simulaciones, se recomienda realizar un análisis y selección del tipo de sustrato adecuado para la antena a diseñar según la aplicación. Debido a que los parámetros del material influyen en el comportamiento del campo de radiación de la antena.

El diseño de una antena Yagi-Uda es experimental, el agregar un elemento director a este tipo de antena entrega una mayor directividad y ganancia, pero hay que recordar que existe un límite de elementos parásitos en una antena Yagi-Uda.

Luego de analizar la cobertura del campo de radiación se recomienda agregar una quinta antena a este sistema de antenas para obtener la cobertura de un ángulo azimuth de 180° .

El uso del simulador CST Studio Suite en el dominio de la frecuencia disminuye el tiempo de simulación y aumenta el rendimiento del estudio obteniendo resultados cercanos a la realidad.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. A. Mustafar *et al.*, “Millimeter-Wave Beamforming MIMO Antenna Design for 5G Wireless Applications,” in *2018 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*, Dec. 2018, pp. 9–12. doi: 10.1109/RFM.2018.8846545.
- [2] J. Gante, G. Falciao, and L. Sousa, “Data-Aided Fast Beamforming Selection for 5G,” in *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 1183–1187. doi: 10.1109/ICASSP.2018.8461461.
- [3] E. H. Mujammami, I. Afifi, and A. B. Sebak, “Optimum wideband high gain analog beamforming network for 5G applications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52226–52237, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912119.
- [4] J. Hesselbarth, D. Lopez Cuenca, and H. B. Molina, “Millimeter-Wave Front-End Integration Concept Using Beam-Switched Lens Antenna.”
- [5] Y. L. Kuo and K. L. Wong, “Printed Double-T Monopole Antenna for 2.4/5.2 Ghz Dual-Band WLAN Operations,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 9, pp. 2187–2192, 2003, doi: 10.1109/TAP.2003.816391.
- [6] K. Griffi and S. Estrada, “ANTENAS PLANARES PARA BEAMFORMING UTILIZANDO ELEMENTOS QUASI YAGIS,” Lima, 2013.
- [7] P. R. Grajek, B. Schoenlinner, and G. M. Rebeiz, “A 24-GHz high-gain Yagi-Uda antenna array,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 5, pp. 1257–1261, May 2004, doi: 10.1109/TAP.2004.827543.
- [8] “IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas”.
- [9] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Clarendon press, 1873.
- [10] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Prentice Hall, Inc., vol. 4ta. México: 2003.
- [11] G. Charis and N. Showme, “Beamforming in Wireless Communication Standards: A Survey,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 1–5, Feb. 2017, doi: 10.17485/ijst/2017/v10i5/99018.
- [12] C. A. Balanis, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*. 2005. [Online]. Available: www.copyright.com.

- [13] Christodoulou, Christos G and Wahid, and Parveen F, *Fundamentals of antennas: concepts and applications*, vol. 50. SPIE Press, 2001.
- [14] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, 1992.
- [15] M. A. Mora Riveros, "Antenas microondas en tecnología microcintas," Bogotá, 2004.
- [16] D. J. Jaramillo Granda and L. G. Quishpe Rea, "Estudio, diseño y construcción de un prototipo de arreglo de antenas microstrip para recepción en la banda x comparable a la ganancia de una antena parabólica," Quito, 2014.
- [17] R. Garg, "Progress in Microstrip antennas," *IETE technical review*, vol. 18, pp. 2–3, 2001.
- [18] R. M. Fishenden and E. R. Wiblin, "Design of Yagi aeriels," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 96, pp. 5–12, 1949.
- [19] A. M. Frenzel, A. Carrasco, E. ;Monachesi, and M. G. Chaile, "FÍSICA DE LAS ONDAS RADIOELÉCTRICAS DENTRO DEL ESTÁNDAR IEEE802.11b ." 2010.
- [20] E. A. Ladino Ordoñez and B. H. Parra Ortega, "Diseño de antena Yagi-Uda a una frecuencia de 5.8 GHz," 2018, Accessed: Feb. 15, 2022. [Online]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16055/3/Articulo.pdf>
- [21] Z. Wang, X. Liu, Y. Yin, J. Wang, and Z. Li, "A Novel Design of Folded Dipole for Broadband Printed Yagi-Uda Antenna," 2014.
- [22] S. Lin, G.-L. Huang, R.-N. Cai, J.-X. Wang, and S. Lin, "NOVEL PRINTED YAGI-UDA ANTENNA WITH HIGH-GAIN AND BROADBAND," 2011.
- [23] H. Karbalaee, M. R. Salehifar, and S. Soleimany, "Designing Yagi-Uda antenna fed by microstrip line and simulated by HFSS," in *2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, Oct. 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICAICT.2012.6398503.
- [24] E. Björnson, M. Bengtsson, and B. Ottersten, "Optimal Multiuser Transmit Beamforming: A Difficult Problem with a Simple Solution Structure [Lecture Notes]," *IEEE Signal Processing Magazine*, Feb. 2014, doi: 10.1109/MSP.2014.2312183.
- [25] W. Roh *et al.*, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736750.

- [26] F. W. Vook, A. Ghosh, and T. A. Thomas, "MIMO and beamforming solutions for 5G technology," in *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Jun. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848613.
- [27] "CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software", Accessed: Feb. 06, 2022. [Online]. Available: <https://www.cst.com>
- [28] C. Chen and D. Cheng, "Optimum element lengths for Yagi-Uda arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 1, pp. 8–15, Jan. 1975, doi: 10.1109/TAP.1975.1141001.

ANEXOS

ANEXO I. Tabla de diseño con longitudes optimizadas no compensadas de elementos parásitos para antenas Yagi-Uda de seis longitudes diferentes.

ANEXO II. Datasheet del sustrato de fibra de vidrio FR4

ANEXO I

TABLE 10.6 Optimized Uncompensated Lengths of Parasitic Elements for Yagi-Uda Antennas of Six Different Lengths

$d/\lambda = 0.0085$ $s_{12} = 0.2\lambda$		Length of Yagi-Uda (in wavelengths)					
		0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2
LENGTH OF REFLECTOR (l_1/λ)		0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
LENGTH OF DIRECTORS, λ	l_3	0.442	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
	l_4		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
	l_5		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
	l_6			0.428	0.398	0.398	0.407
	l_7				0.390	0.394	0.403
	l_8				0.390	0.390	0.398
	l_9				0.390	0.386	0.394
	l_{10}				0.390	0.386	0.390
	l_{11}				0.398	0.386	0.390
	l_{12}				0.407	0.386	0.390
	l_{13}					0.386	0.390
	l_{14}					0.386	0.390
	l_{15}					0.386	0.390
	l_{16}					0.386	
	l_{17}					0.386	
SPACING BETWEEN DIRECTORS (s_{ik}/λ)		0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
DIRECTIVITY RELATIVE TO HALF-WAVE DIPOLE (dB)		7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2
DESIGN CURVE (SEE FIGURE 10.27)		(A)	(B)	(B)	(C)	(B)	(D)

(SOURCE: Peter P. Vezbicke, *Yagi Antenna Design*, NBS Technical Note 688, December 1976).

ANEXO II



FR4 Data Sheet :-

<u>Test/Specification</u>	<u>FR4 Laminate Typical Values</u>
Thermal Stress, Solder bath 288 deg. C	>60
Dimensional Stability, E-2/150	<0.04% Warp/fill <1.00% Bow/Twist
Flammability, Classification UL94	V0
Water Absorption E-1/105	0.10%
Peel Strength After Thermal Stress	11 lb./in After 10s/288 Deg. C
Flexural Strength	100,000 lbf/in ² Lengthwise 75,000 lbf/in ² Crosswise
Resistivity After Damp Heat Volume	10 ⁸ M ohms cm
Resistivity After Damp Heat Surface	10 ⁸ M ohms
Dielectric Breakdown. Parallel to laminate	>60KV
Dielectric Constant @ 1MHz	4.7
Dissipation Factor @ 1MHz	0.014
Q-Resonance @ 1 MHz	>75
Q-Resonance @ 50 MHz	>95
Arc Resistance	125 s
Glass Transition Temperature	135 Deg. C
Temperature Index	130 Deg. C
<u>A Few Other Relevant Facts from other Sources</u>	
Specific Gravity	1.8-1.9
Rockwell Hardness (M scale)	110
Coefficient of Thermal Expansion	11 microns/m/Deg.C Lengthwise 15 microns/m/Deg.C Crosswise
Thermal Conductivity	2.2-2.5 cal/h. cm Deg C