

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO, POR MEDIO DE SIMULACIONES  
ELECTROMAGNÉTICAS, DE ANTENAS DE APERTURA DE  
BANDA ANCHA EN ONDAS MILIMÉTRICAS PARA  
APLICACIONES 5G A 30 GHz**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**FRANCISCO JAVIER VIZUETE BASSANTE**

**DIRECTOR: DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA**

**CODIRECTOR: M.SC. RAMIRO EDUARDO MOREJÓN TOBAR**

**Quito, Octubre 2021**

## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Francisco Javier Vizúete Bassante, bajo nuestra supervisión.

---

**DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**M.SC. RAMIRO EDUARDO MOREJÓN TOBAR**  
**CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Francisco Javier Vizuite Bassante, declaro bajo juramento que el trabajo 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.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

Francisco Javier Vizuite Bassante.

## **DEDICATORIA**

A toda mi familia en especial a mis padres y hermana, quienes siempre han demostrado un amor puro e incondicional hacia mí, y se han convertido en mi motivación y motor para cada día seguir creciendo y ser una mejor persona.

A mis amigos quienes han sido una parte fundamental en cada etapa de mi vida, y han estado conmigo en todo momento, forjando así una verdadera amistad que perdurará en el tiempo.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios quien me ha dado sabiduría y muchas bendiciones para poder completar cada paso importante a lo largo de mi vida; además por brindarnos salud, vida, felicidad y prosperidad a mi familia.

A mis padres, José y Cecilia por el infinito amor y el apoyo incondicional que me han brindado; por siempre velar y hacer todo lo posible por el bienestar de mi hermana y el mío. Además, por dame valiosos consejos y estar siempre presentes de cualquier manera en mi día a día. Estaré agradecido toda mi vida con ustedes, los amo mucho.

A mi hermanita Joselyn por siempre darme mucho cariño, ayudarme en cualquier situación y ser una persona muy importante para mí.

A mi familia por siempre estar pendiente de mí y compartir mis alegrías.

A todos mis amigos de la universidad ya que, gracias a ustedes, esta etapa ha sido muy alegre. En especial a Vivi por aconsejarme, apoyarme y estar conmigo en todo momento.

A mis grandes amigos de toda la vida.

Al Dr. Hernán Barba por darme la oportunidad de trabajar junto a usted y así aprender mucho más acerca de RF. Por todo el apoyo y guía en este proceso de titulación; y finalmente por los grandes consejos para lograr futuros objetivos propuestos en mi vida; más que un profesor lo considero un gran amigo.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE .....	3
1.3 MARCO TEÓRICO .....	4
1.3.1 TECNOLOGIA ULTRA WIDEBAND .....	4
1.3.2 ANTENAS DE BANDA ANCHA .....	6
1.3.3 TIPOS DE ALIMENTACIÓN PARA ANTENAS TSA .....	9
1.3.4 TÉCNICAS DE MINIATURIZACIÓN PARA ANTENAS TSA .....	16
2 METODOLOGÍA.....	18
2.1 ELECCIÓN DEL SUSTRATO.....	18
2.2 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN POR TRANSICIÓN LÍNEA <i>MICROSTRIP – SLOTLINE</i> .....	19
2.2.1 DISEÑO ANTENA <i>SLOT</i> (RANURA).....	19
2.2.2 DISEÑO DE ESTRUCTURA DE APERTURA - ANTENA VIVALDI.....	38
2.2.3 ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA .....	50
2.2.4 ESTUDIO DE CORRUGACIONES.....	55
2.3 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN ANTIPODAL .....	67

2.3.1	DISEÑO DE ALIMENTACIÓN.....	67
2.3.2	DISEÑO DE ESTRUCTURA DE APERTURA – ANTENA VIVALDI ANTIPODAL.....	71
2.3.3	ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA .....	80
2.3.4	ESTUDIO DE CORRUGACIONES.....	85
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	93
3.1	ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN POR TRANSICIÓN LÍNEA MICROSTRIP-SLOTLINE.....	93
3.1.1	ESTRUCTURA DE ALIMENTACIÓN.....	93
3.1.2	ESTRUCTURA DE APERTURA.....	94
3.1.3	ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACION TRANSICION LÍNEA MICROSTRIP-SLOTLINE CON STUBS RADIALES .....	96
3.1.4	ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA .....	97
3.1.5	CORRUGACIONES EXTERNAS.....	100
3.1.6	CORRUGACIONES INTERNAS.....	103
3.2	ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN ANTIPODAL .....	107
3.2.1	ESTRUCTURA DE APERTURA.....	107
3.2.2	ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN ANTIPODAL.....	109
3.2.3	ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA .....	111
3.2.4	CORRUGACIONES EXTERNAS.....	113
3.2.5	CORRUGACIONES INTERNAS.....	120
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	125
4.1	CONCLUSIONES .....	125
4.2	RECOMENDACIONES .....	129
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se presenta el diseño, modelamiento y simulación de antenas Vivaldi que operan en el espectro de ondas milimétricas, específicamente a la frecuencia de 30 GHz, para una futura implementación en aplicaciones de tecnología 5G. La primera antena Vivaldi tiene una estructura de alimentación transición línea *microstrip-slotline*, mientras que la segunda antena Vivaldi tiene una estructura de alimentación antipodal.

En primer lugar, se presenta una breve descripción de la tecnología UWB, así mismo de antenas TSA y la teoría necesaria acerca de las estructuras de alimentación propuestas y métodos de miniaturización.

Seguidamente, se realiza el diseño, modelamiento y simulación, en la herramienta CST Studio Suite, de las estructuras de alimentación y estructura radiante de cada antena Vivaldi.

A las antenas Vivaldi diseñadas se modifica el perfil exponencial, que define su estructura de apertura, y se añaden corrugaciones en la parte externa e interna de la sección radiante con el fin mejorar las características de radiación y lograr la miniaturización de las antenas originales.

Finalmente, se analizan los resultados circuitales y radiantes obtenidos para cada estructura.

**PALABRAS CLAVE:** Antena Vivaldi, *microstrip-slotline*, perfil exponencial, estructura antipodal, miniaturización, CST Studio Suite



## **ABSTRACT**

In this work, the design, modeling and simulation of Vivaldi antennas operating in the millimeter wave spectrum, specifically at the 30 GHz frequency, for future implementation in 5G technology applications are presented. The first Vivaldi antenna has a microstrip-slotline transition feed structure, while the second Vivaldi antenna has an antipodal feed structure.

First, a brief description about UWB technology, as well as TSA antennas and the necessary theory about the proposed feed structures and miniaturization methods are shown.

Afterwards, the design, modeling and simulation of the feed and radiating structures of each Vivaldi antenna is carried out using CST Studio Suite tool.

The exponential profile that defines its aperture structure is modified to the designed Vivaldi antennas, and corrugations are added to the external and internal part of the radiating section in order to improve the radiation characteristics and achieve the miniaturization of the original antennas.

Finally, circuital and field results obtained for each structure are analyzed.

**KEYWORDS:** Vivaldi antenna, microstrip-slotline, exponential profile antipodal structure, miniaturization, CST Studio Suite

# 1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la tecnología inalámbrica ha crecido a un ritmo formidable, creando así nuevos y mejorados servicios a costos más bajos. Estos nuevos servicios resultan muy atractivos para el público en general, provocando un aumento de suscriptores y de demanda [1].

La demanda de servicios de datos está aumentando a tasas sin precedentes [2]. El espectro de las redes inalámbricas actuales (3G o 4G), las cuales operan a frecuencias inferiores a 3 GHz, están experimentando una grave escasez y no podrán mantenerse al día con el rápido aumento de la velocidad de comunicación en un futuro cercano [2]. Es por ello que, las redes actuales muy pronto serán ineficaces ya que su ancho de banda operativo tiene una capacidad de canal limitada para las necesidades futuras [3].

Lo antes mencionado es la razón principal por lo que se necesita una red que soporte las necesidades venideras. Dicha red requerirá un ancho de banda muy amplio que permita la transmisión de múltiples megabits por segundos con alta disponibilidad y fiabilidad [4]. Es así como surge la necesidad del avance y desarrollo de la tecnología de ondas milimétricas (*mmWave*) ya que, al incrementar la frecuencia de operación, los sistemas mantienen su ancho de banda relativo lo que permite un incremento del ancho de banda absoluto, llevando consigo el aumento de la capacidad del canal. Es por ello que esta tecnología resulta ser una solución efectiva e innovadora para las redes de comunicaciones inalámbricas 5G [3].

La red 5G junto con la tecnología de ondas milimétricas desarrollarán diversas áreas de tecnologías inalámbricas fundamentales existentes como la banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicación ultra confiable de baja latencia (URLLC), IoT masivo y comunicación masiva de tipo máquina (mMTC); este desarrollo traerá consigo múltiples aplicaciones que evolucionará la industria [5]. Dentro de estas tecnologías emergentes se tiene un sin número de aplicaciones como la automatización de fábrica, conducción autónoma, aplicaciones para redes personales o redes locales (WPAN/WLAN), aplicaciones para comunicaciones inalámbricas 5G, sistemas de radares, antenas de banda ancha *mmWave*, entre otras.

A pesar de que la nueva tecnología antes mencionada trae consigo múltiples beneficios; el incremento en la frecuencia de operación conlleva dificultades naturales relacionadas a la implementación en capa física tales como, pequeño tamaño de las antenas, bajos niveles de ganancias o alta pérdida de propagación, entre otros [6]. Asimismo, a nivel de sistemas,

esta tecnología demanda diseños de redes más densas debido al desvanecimiento de la onda en función del radio de propagación [7].

Al ser las antenas componentes fundamentales en el sistema de telecomunicaciones, la utilización de antenas del tipo Antenas de Ranura Cónica o TSA por sus siglas en inglés (*Tapered Slot Antennas*) han dado cabida a solucionar diferentes dificultades [4]. Un ejemplo de este tipo de antenas son las conocidas como Vivaldi o las antenas antipodales las cuales ofrece un amplio ancho de banda, peso liviano y facilidad en su construcción [2]. De hecho, es un gran candidato para ser una antena presente tanto en estaciones base como en dispositivos portátiles debido a que es un elemento direccional orientable de bajo perfil [5].

El presente proyecto de titulación propone un estudio, por medio de simulaciones electromagnéticas realizadas en la herramienta CST Studio Suite, de diferentes estructuras de antenas para operación en ondas milimétricas basadas en las antenas del tipo TSA como premisa para futuras implementaciones en aplicaciones 5G.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Estudiar antenas de apertura de banda ancha en ondas milimétricas para aplicaciones 5G a una frecuencia de operación de 30 GHz mediante simulaciones electromagnéticas.

Los objetivos específicos del presente Proyecto Técnico son:

- Describir brevemente las diferentes realizaciones de antenas en ondas milimétricas.
- Diseñar alimentaciones en CST Studio Suite de transiciones *microstrip-slot* y *coax-microstrip* para antenas TSA y antipodales, respectivamente.
- Implementar en CST Studio Suite dos tipos de antenas: TSA y antipodal para 30 GHz.
- Realizar el modelamiento y simulación de corrugaciones para miniaturización de las antenas implementadas.
- Analizar de manera comparativa las estructuras simuladas en base a parámetros de acoplamiento y parámetros radiantes.

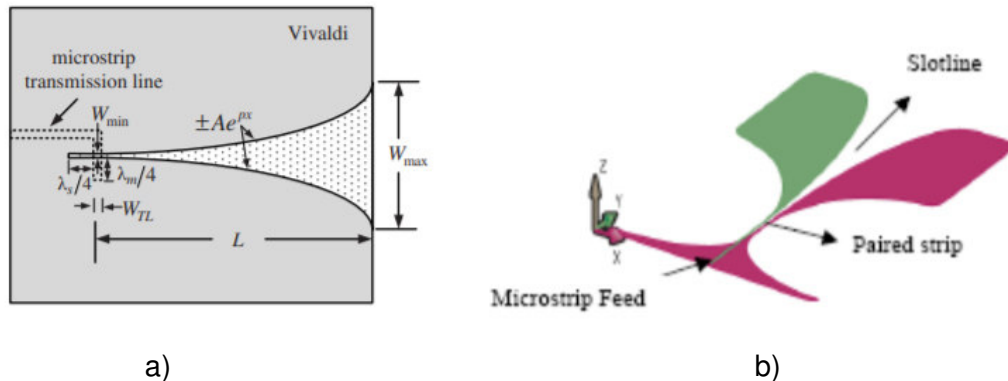
## 1.2 ALCANCE

El presente trabajo de titulación propone el diseño, modelado y simulación de antenas TSA, que operen a la frecuencia de 30 GHz, con estructuras de alimentación tipo ranura (acoplada por línea *microstrip*) y antipodal. También, se incluye el análisis de diferentes resultados en base a parámetros de acoplamiento y de radiación al añadir métodos de miniaturización y con la modificación en la estructura de apertura de la antenna.

En primer lugar, se realizará una breve descripción sobre la familia de antenas de banda ancha TSA, esta descripción incluye sus principios, características y los diferentes tipos de antenas. Asimismo, se describirán las diferentes técnicas que se utilizan tanto para su alimentación como para su miniaturización.

Seguidamente, se diseñará una antena TSA con apertura exponencial comúnmente conocida como antena Vivaldi, la cual incluye el diseño de alimentación por acoplamiento de ranura con línea *microstrip*. Además, se diseñará una antena antipodal con alimentación de transición coaxial a *microstrip*. Ambos diseños están pensados en la banda de ondas milimétricas a la frecuencia de 30 GHz. Se presentarán métodos de miniaturización y configuración de su estructura mediante la variación del perfil dado por la curva exponencial que define la apertura de la antena, tal como se aprecia en la Figura 1.1. Se realizará el modelamiento de estas estructuras en el software de simulación CST Studio Suite.

Por último, se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones de las antenas en términos de acoplamiento, ancho de banda y diagramas de radiación.



**Figura 1.1** Antenas TSA. a) Antena Vivaldi con alimentación tipo acoplamiento ranura-*microstrip* [1]. b) Antena antipodal con alimentación tipo acoplamiento coaxial-*microstrip* [8].

## 1.3 MARCO TEÓRICO

En la presente sección se abordará conceptos relacionados con la tecnología inalámbrica de banda ultra ancha o UWB (por sus siglas en inglés *Ultra Wideband*), además se realizará una breve descripción sobre la familia de antenas de banda ancha TSA, la cual incluye principios, características y los diferentes tipos de antenas. Asimismo, se describirá las diferentes técnicas que se utilizan tanto para su alimentación como para su miniaturización.

### 1.3.1 TECNOLOGIA ULTRA WIDEBAND

La presente sección abarca conceptos, ventajas y aplicaciones de la tecnología UWB.

#### *Definición y conceptos*

La tecnología de banda ultra ancha (UWB), aplicada por primera vez por Heinrich Hertz en 1887, nunca ha gozado de tanto interés de los investigadores y la industria como en la actualidad. El gran ancho de banda que ofrece UWB resulta bastante atractivo para diferentes aplicaciones [9]. A diferencia de las antenas de banda estrecha, en las cuales los parámetros característicos de éstas son constantes en un pequeño porcentaje del ancho de banda; para sistemas UWB se debe considerar tanto las características de las antenas como el comportamiento del canal que dependen de la frecuencia [10].

La FCC (*Federal Communications Commission*) define UWB como cualquier señal que ocupa más de 500 MHz de ancho de banda en la banda de 3,1 GHz a 10,6 GHz [11].

Además, los sistemas UWB también se los definen por medio del concepto de “ancho de banda fraccional” o también conocido como “ancho de banda relativo”, el cual está dado por la ecuación (1.1).

$$B_F = \frac{f_U - f_L}{(f_U + f_L)/2} \times 100\% \quad (1.1)$$

En donde  $f_L$  y  $f_U$  son las frecuencias en los bordes superior e inferior del ancho de banda, respectivamente. Por medio de este concepto se puede categorizar a una señal o a una antena de la siguiente manera:

- a. Banda estrecha si  $0\% \leq B_F \leq 1\%$
- b. Banda ancha si  $1\% \leq B_F \leq 25\%$  y, por último
- c. Banda ultra ancha si  $25\% \leq B_F \leq 200\%$  [12].

### *Ventajas de la tecnología UWB*

A continuación, se expone algunas de las ventajas que posee la tecnología UWB.

➤ Comunicaciones de alta velocidad

En la mayoría de los sistemas de comunicación digital, el ancho de banda es igual o casi igual a la velocidad de símbolo del canal. Por lo tanto, para los sistemas convencionales de “banda estrecha”, la tendencia hacia velocidades de datos más altas ha dado como resultado la asignación de frecuencias centrales más altas (portadoras). Generalmente con los sistemas actuales, las pérdidas y la degradación por propagación aumentan con la frecuencia. La tecnología UWB ofrece altas velocidades de datos utilizando frecuencias centrales relativamente bajas [13].

➤ Potencia en la ganancia de procesamiento

La ganancia de procesamiento en un sistema de comunicación se define como la relación entre el ancho de banda de ruido en el extremo frontal del receptor y el ancho de banda de los datos. Por lo general, esta relación se calcula adecuadamente como la relación entre la velocidad del símbolo del canal (modulación),  $R_s$ , y la velocidad de bits,  $R_b$ , representado en la ecuación (1.2).

$$PG = \frac{R_s}{R_b} \quad (1.2)$$

El ancho de banda disponible usando dispositivos UWB (velocidades de conmutación en el rango de Gigahertz) es tan grande que, para muchas aplicaciones, la alta velocidad de datos deseada y un margen de ganancia de procesamiento se pueden lograr simultáneamente [13].

### *Aplicaciones de la tecnología UWB*

En la actualidad existe una gran variedad de aplicaciones para la tecnología UWB dentro del mercado comercial inalámbrico, así también dentro de los sistemas de comunicaciones gubernamentales y militares [13]. Entre las aplicaciones más relevantes se tiene:

- WPAN de alta velocidad.
- Comunicaciones sigilosas de bajo consumo
- Localización indoor
- Comunicaciones de acceso múltiple.

### 1.3.2 ANTENAS DE BANDA ANCHA

Esta sección trata algunos tipos de antenas de banda ancha alineadas al objetivo del presente proyecto.

#### *Antenas de Ranura Cónica TSA*

Las antenas de ranura cónica TSA consisten en una ranura cónica grabada en un metal el cual se ubica sobre un sustrato dieléctrico. Las antenas TSA utilizan la propagación de onda viajera a lo largo de su estructura para proveer una velocidad de fase menor a la velocidad de la luz ( $v_{ph} < c_0$ ) [14].

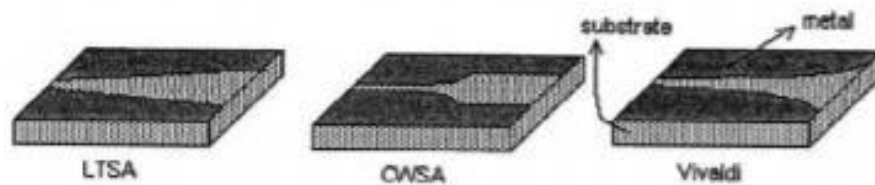
Este tipo de antenas tienen un gran potencial para aplicaciones donde se requiere una alta directividad, con anchos de haz desde los 12 ° hasta los 60 °. En este tipo de aplicaciones, la utilización de antenas TSA se hacen muy necesarias, ya que a altas frecuencias, las dimensiones de bocinas y guías de onda empiezan a ser muy pequeñas lo que resulta en una dificultad la fabricación de sus componentes con la precisión necesaria, por otro lado, son difíciles de utilizar en configuraciones de arreglo debido a las dimensiones de gran tamaño en las que resultan [8]. La desventaja que se obtiene al escoger antenas TSA es la pérdida de eficiencia del lóbulo principal debido a la estructura de apertura característica de esta familia de antenas [15].

Además del tamaño y fácil implementación, este grupo de antenas posee otras ventajas que se mencionan a continuación [14].

- Producen anchos de haz más estrechos y ganancias más elevadas que las antenas de parches *microstrip*, dipolos o *slots*.
- Proveen anchos de haz simétricos tanto en el plano E como en el plano H, a pesar de su geometría plana.
- El ancho de banda de operación es más ancho que el de los elementos típicos de antenas de banda ancha, exceptuando la espiral de periodicidad logarítmica.
- Facilitan la integración de un sistema de alimentación con mezcladores y amplificadores en un mismo sustrato conjuntamente con la estructura de la antena, y ofrecen la posibilidad de poner un gran número de estas antenas en el mismo sustrato.

A la familia de antenas TSA se las puede categorizar en dos grupos principales: antenas *broadside* y antenas *end-fire*. Las antenas *broadside* se caracterizan porque la dirección de radiación es perpendicular al plano de la antena. Dentro de este grupo se puede

mencionar a la antena *Bowtie* y a la antena espiral periódica. Por otro lado, las antenas *end-fire* se caracterizan porque poseen sus patrones de radiación con el máximo de radiación en el plano de la antena [8]. Dentro de este grupo se tienen diferentes tipo de antena cuya clasificación depende de la ecuación de la curva que describe su estructura de apertura, de las cuales se puede mencionar la LTSA (Antena de Apertura Cónica Lineal), la CWSA (Antena de Ancho de Ranura Constante) y la Vivaldi la cual posee una estructura de apertura de forma exponencial, tal como se observa en la Figura 1.2 [8].

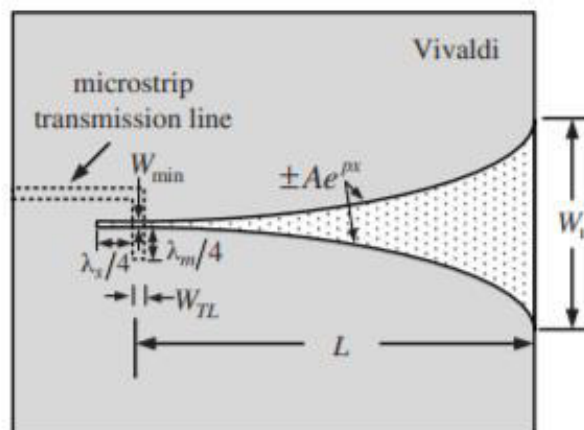


**Figura 1.2** Antenas *End-Fire* [8].

#### *Antena Vivaldi*

La antena Vivaldi fue desarrollada por Gibson en 1979 como un elemento de antena plana con el cual se logra un haz de salida simétrico, con una directividad de valor apreciable y con lóbulos laterales pequeños [8].

Su geometría básica se muestra en la Figura 1.3 y generalmente se implementa sobre un sustrato con el diseño exponencial característico de la Vivaldi grabado en el revestimiento superior del sustrato [1]. La razón de utilizar este tipo de apertura es que con ello se asegura que la antena sea independiente de la frecuencia y lo que ocurre es que sólo una parte de la estructura exponencial será eficientemente radiante para una longitud de onda dada [14].



**Figura 1.3** Antena Vivaldi [1].



La estructura más común, la cual conlleva una alimentación de transición *microstrip- slotline*, consiste en una ranura uniforme de tamaño  $\lambda_s / 4$  que se encuentra conectada a una ranura cónica de característica exponencial (área resonante); el subíndice “s” se utiliza para identificar la ranura (*slot*). La ranura es alimentada por una línea de transmisión *microstrip* de longitud  $\lambda_m / 4$  en donde el subíndice “m” identifica la *microstrip* tal como se indica en la Figura 1.3.

El diseño Vivaldi suele ser de bajo costo y posee excelentes características de radiación, como alta ganancia, rendimiento de banda ancha y ancho de haz constante. La directividad de las antenas Vivaldi aumentan a medida que aumenta la longitud de la curva exponencial o también conocido como *taper* ( $L$ ); mientras que el ancho de banda está limitado por el ancho inicial de la apertura  $W_{\min}$  y el ancho final de la apertura exponencial  $W_{\max}$  de la antena [1].

La dificultad en la alimentación de una antena Vivaldi vendrá al querer utilizar un sustrato con una constante dieléctrica pequeña. En este caso, se obtendrá impedancias elevadas en la *slotline*, la cual tendrá que ser adaptada mediante una transición en la alimentación [8].

Otra consideración que resulta ser un punto crítico es encontrar el valor adecuado para el grosor del sustrato puesto que los lóbulos laterales incrementan su magnitud en sustratos más gruesos, mientras que el lóbulo principal se ensancha en sustratos más finos, y además, hace que se obtenga dimensiones para la antena demasiado pequeñas con lo cual se tendría problemas en el momento de la implementación de la antena [14].

#### *Principio de radiación de la antena Vivaldi*

Cuando la separación entre las placas metálicas es muy pequeña en comparación con la longitud de onda en el espacio libre, las ondas están concentradas; mientras esta separación aumenta las ondas son radiadas hacia el exterior. Debido a este comportamiento se puede dividir a la antena en dos partes [14]:

- Para longitudes de apertura menor a  $\lambda_0 / 2$ , la onda es guiada por la ranura.
- Para longitudes de apertura mayores a  $\lambda_0 / 2$ , la onda se propaga por el dieléctrico hasta que es radiada hacia el espacio libre.

### *Perfil de la estructura de apertura*

Como se puede observar en la Figura 1.3, la sección de apertura de la antena es una ranura exponencial cortada en una película delgada de metal que se encuentra soportada sobre un sustrato. La función que describe la apertura exponencial que rige a la estructura de radiación viene dada por la ecuación (1.3).

$$y(x) = \pm A \times e^{p \times x} \quad (1.3)$$

Donde la variable “y” es la mitad de la separación de la ranura, “x” es la posición a lo largo de la antena, “A” es la mitad del ancho de apertura  $W_{\min}$  y “p” es la tasa de apertura del perfil exponencial y tienen gran importancia en la ganancia de la antena. Mientras mayor sean los valores de “p” se mejorará la resistencia para bajas frecuencias, pero simultáneamente crea mayores variaciones en la resistencia y en la reactancia en todo el ancho de banda. Por lo tanto, para aplicaciones de ancho de banda amplio, generalmente se requiere un compromiso en la selección del valor de la tasa de apertura [1].

Como se ha mencionado anteriormente, la tasa de apertura incide significativamente en las características de radiación de la antena, así como también en el ancho de banda operativo y en el ancho del haz. En general a medida que aumenta la tasa de apertura, aumenta el ancho de haz en el plano E, disminuye el ancho de haz en el plano H y aumenta el ancho de banda [1].

Mediante estudios paramétrico se ha demostrado que el rendimiento óptimo se logra cuando la longitud “L” es mayor que a una longitud de onda a la frecuencia más baja. El ancho de apertura inicial  $W_{\min}$  se basa en la frecuencia más alta mientras que el ancho de apertura final  $W_{\max}$  influye en la frecuencia más baja [1].

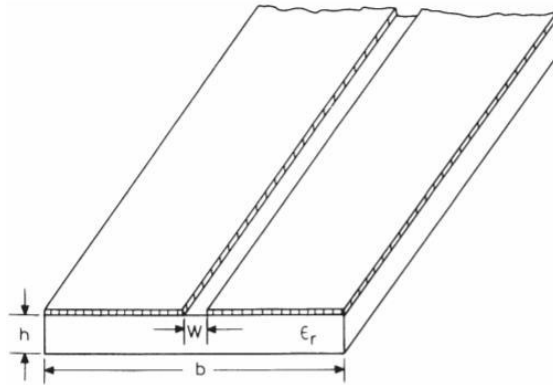
Además, se establece que la energía en la ranura o *slot* se distribuye entre el sustrato y el aire. Consecuentemente, la constante dieléctrica efectiva es menor que la propia del sustrato, produciendo una modificación en la longitud de onda guiada en la ranura, que tiene un efecto pronunciado en el patrón del plano H [8].

### **1.3.3 TIPOS DE ALIMENTACIÓN PARA ANTENAS TSA**

Con el fin de tener una base teórica en la cual apoyarse para la determinación de las diferentes dimensiones necesarias que implica el diseño de la alimentación de la antena, se realizará una breve descripción sobre la teoría de *slotlines* y líneas *microstrip*.

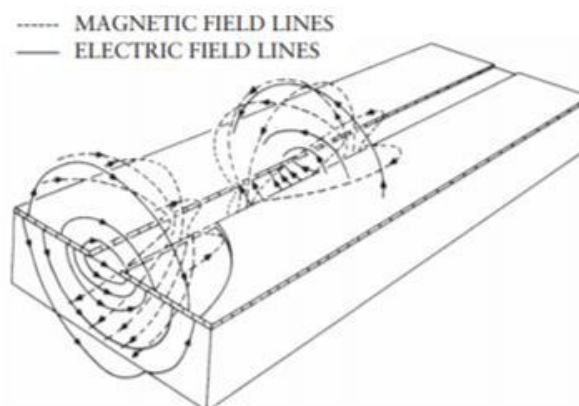
## Teoría de Slotlines

Una *slotline* es una estructura de transmisión plana cuya configuración básica se muestra en la Figura 1.4. Consiste en una ranura estrecha de anchura  $w$  grabada en la metalización que descansa sobre un lado del sustrato dieléctrico de altura  $h$ . El lado opuesto del sustrato no se encuentra metalizado [16].



**Figura 1.4** Estructura de una *Slotline* [16].

En una *slotline*, la onda se propaga a lo largo de la ranura con el componente principal del campo eléctrico orientado a través de la ranura en el plano de metalización del sustrato dieléctrico, tal como se observa en la Figura 1.5. El modo de propagación no es TEM<sup>1</sup> y es de naturaleza casi eléctrica transversal. Sin embargo, a diferencia de las guías de onda convencionales, no existe un corte de baja frecuencia porque la *slotline* es una estructura de dos conductores [16].



**Figura 1.5** Distribución de campos en una *Slotline* [16].

<sup>1</sup> TEM – *Transverse Electromagnetic* Modo de propagación que por definición ambos campos eléctrico y magnético tienen componentes solo en el plano transversal a la dirección de propagación [16].

➤ Longitud de onda en una *Slotline*

Como se observa en la Figura 1.5, las componentes del campo de esta estructura no se confinan únicamente en el sustrato, sino que se extienden hacia las regiones de aire tanto por encima de la ranura como también por debajo del sustrato. Por lo tanto, la energía se distribuye entre el sustrato y las regiones de aire [16]. Por esta razón, la constante dieléctrica efectiva para un *slot* ( $\epsilon_{re}$ ) se determina con la ecuación (1.4).

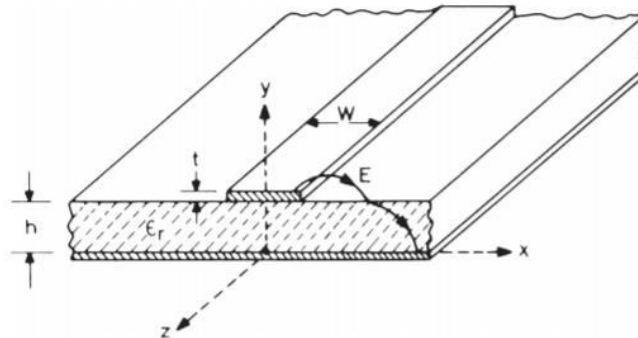
$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (1.4) [16]$$

Por ende, la longitud de onda está dada por la ecuación (1.5)

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1.5) [16]$$

*Teoría de Líneas Microstrip*

La configuración básica de esta estructura se presenta en la Figura 1.6, la cual se conforma por un material conductor muy amplio que funciona como plano de masa; sobre el conductor se coloca un sustrato dieléctrico de permitividad  $\epsilon_r$  y espesor  $h$ . Encima del sustrato se encuentra la línea *microstrip* de espesor  $t$  y ancho  $w$  [16].



**Figura 1.6** Estructura de una línea *Microstrip* [16].

➤ Longitud de onda en una línea *microstrip*

Debido al campo disperso fuera de la región entre los conductores, el análisis de la permitividad efectiva de esta estructura se vuelve complicado. Por medio de diferentes estudios se determinó que este parámetro se determina con la expresión que se detalla en la ecuación (1.6).

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} + 0,04(1 - \frac{w}{h})^2 \right] \quad (1.6) [16]$$

Una vez encontrado el valor de la constante dieléctrica efectiva se puede calcular la longitud de onda de la línea *microstrip* utilizando la ecuación (1.7).

$$\lambda_m = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (1.7) [16]$$

➤ Impedancia de una línea *microstrip*

Mediante las expresiones halladas por Wheeler se ha logrado determinar la impedancia característica de una línea *microstrip*. A partir de ella se han realizado aproximaciones y mejoras para diversas situaciones [17]. Dichas expresiones se presentan en las ecuaciones (1.8) y (1.9).

Si  $w/h \leq 1$

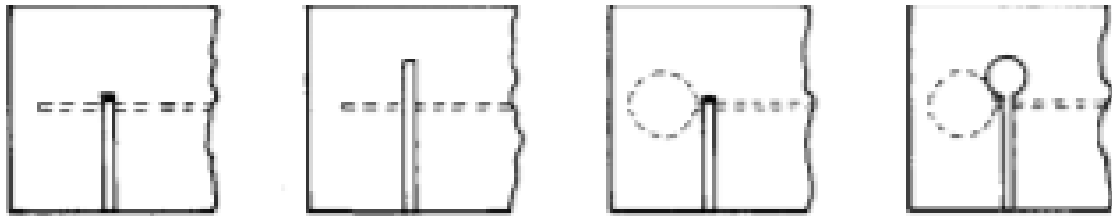
$$Z_o = \frac{\eta_o}{2\pi\sqrt{\epsilon_{re}}} \times \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \quad (1.8) [17]$$

Si  $w/h > 1$

$$Z_o = \frac{\eta_o}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \times \frac{1}{\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1,444 \right)} \quad (1.9) [17]$$

El diseño de la estructura de alimentación para una antena Vivaldi es de suma importancia, ya que con las dimensiones adecuadas se logra maximizar el ancho de banda de operación de la antena.

El método más apropiado y común para realizar la estructura de alimentación de una antena TSA es por medio de una línea de ranura o *slotline*. Esta estructura acopla la señal a la antena desde un circuito plano como una línea *microstrip*. Es por ello que, se necesita un diseño compacto y con bajas pérdidas para realizar una transición que involucre *slotlines* [8]. En la Figura 1.7, se ilustra las diferentes transiciones existentes entre una *microstrip-slotline*.



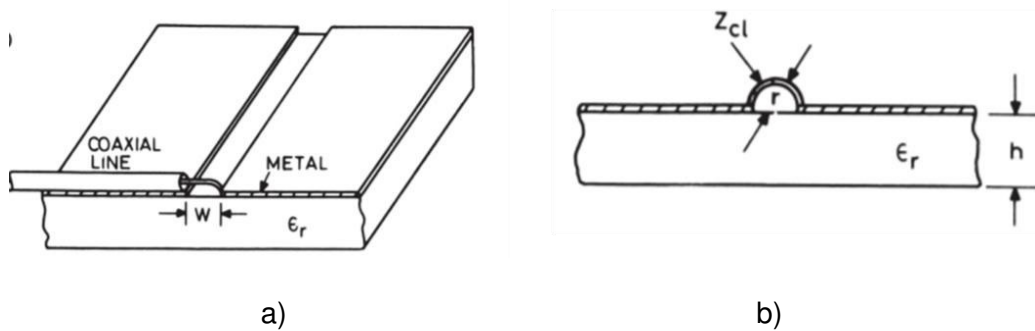
**Figura 1.7** Técnicas de alimentación transición *microstrip-slotline* [18].

### Transiciones de slotline

Para probar y diseñar circuitos que involucran *slotlines* es necesario tener una transición entre una *slotline* y el equipo de medición. Una transición de coaxial a *slotline* se usa comúnmente para este propósito. Las transiciones entre *slotlines* y otras líneas de transmisión también son útiles y aumentan las aplicaciones de las *slotlines*. Una de esas transiciones es *microstrip-slotline*. Estos dos tipos de transiciones se analizan a continuación [16].

#### ➤ Transición Coaxial-*Slotline*

En la Figura 1.8(a) se muestra el uso común de la transición coaxial-*slotline*. Este método consiste en una línea coaxial miniaturizada colocada perpendicularmente al final de la ranura la cual termina en circuito abierto. El conductor externo del coaxial está conectado eléctricamente a la placa metálica del lado izquierdo del plano de la ranura, mientras que el conductor interno se conecta a la placa metálica del lado opuesto formando un semicírculo por encima de la ranura tal como se observa en la Figura 1.8(b) [16].



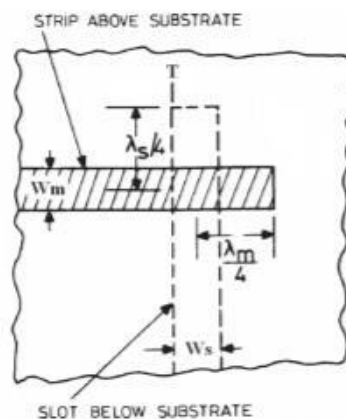
**Figura 1.8** Transición coaxial-*slotline*. a) Vista frontal. b) Vista lateral [16].

#### ➤ Transición de cruce *Microstrip-Slotline*

La mayoría de los circuitos, en los que se utiliza una *slotline*, también incorporan una línea *microstrip*. La línea *microstrip* es un medio no balanceado mientras que el medio usado para la alimentación de la estructura de apertura consiste en uno balanceado, como lo es la *slotline*. Es por esta razón que, es muy importante un buen diseño de la transición

*microstrip-slotline* ya que con ello se puede lograr un ancho de banda operacional muy amplio e independiente de la frecuencia [8].

Esta transición se la aprecia en la Figura 1.9, la cual consiste en una línea de ranura que se encuentra grabada en un lado del sustrato, la cual está cruzada en ángulo recto por la línea *microstrip* ubicada en el lado opuesto; esta característica hace posible un diseño de circuito de dos niveles. La línea *microstrip* se extiende aproximadamente un cuarto de longitud de onda ( $\lambda_m / 4$ ) desde el centro de la ranura, mientras que la slotline de la misma manera se extiende aproximadamente un cuarto de longitud de onda ( $\lambda_s / 4$ ) desde el centro de la *microstrip*. El acoplamiento entre la línea *microstrip* y la *slotline* se produce mediante campos magnéticos [16].



**Figura 1.9** Transición *microstrip-slotline* [16].

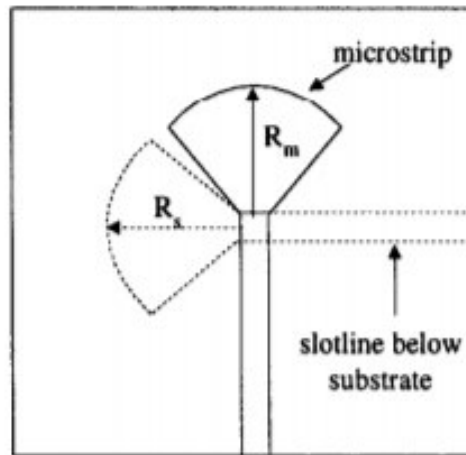
En resumen, este tipo de transición se conforma de dos elementos los cuales tienen funciones específicas dentro de la antena.

- *Microstrip*, necesaria para la conexión con el resto del circuito y para realizar la alimentación de la antena.
- *Slotline*, elemento imprescindible para acoplar la potencia a la parte radiante.

La mayor desventaja de este tipo de transición es la limitación que produce en el ancho de banda operacional. Se ha realizado algunas investigaciones en donde se ha descubierto algunas mejoras para esta transición con el fin de mejorar no solo el ancho de banda sino también características de radiación [8]. Entre esos métodos se encuentra transición *microstrip-slotline* con terminación radial.

➤ Transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales

Este método se fundamenta en el principio básico de la transición *microstrip-slotline*, pero a diferencia del método ya conocido, este diseño tiene sus terminaciones en *stubs* radiales tal como se observa en la Figura 1.10. Los *stubs* radiales tienen un radio correspondiente a un cuarto de longitud de onda tanto para la *microstrip* como para la *slotline*. Este diseño permite mejorar el ancho de banda para la transición.



**Figura 1.10** Transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales [19].

La idea de este método es que el *stub* radial de la línea *microstrip*, que aseguraba un circuito abierto, debe aparecer como un cortocircuito, mientras que el *stub* radial correspondiente a la *slotline*, que aseguraba un cortocircuito, debe aparecer como un circuito abierto en el plano de referencia de cruce [19].

*Configuración antipodal*

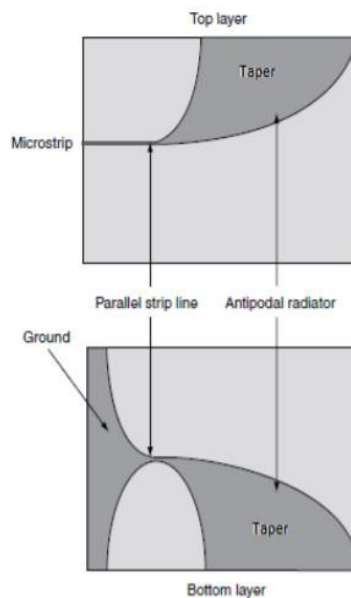
La estructura antipodal se puede observar en la Figura 1.11. Esta configuración se caracteriza principalmente por tener un ancho de banda mucho más amplio con respecto a los anteriores métodos de alimentación mencionados. A diferencia de la Vivaldi tradicional analizada, la Vivaldi antipodal separa las estructuras de apertura poniendo un *taper* en la cara superior del sustrato y el otro en la cara inferior.

En esta estructura de alimentación se utiliza una línea *microstrip* cuyo plano de masa gradualmente se estrecha hasta formar una línea de transmisión compuesta por un par de *striplines*. El diseño apropiado de esta estructura asegura que la alimentación sea balanceada y con ello no existe la necesidad de añadir un balun.



Por otro lado, la línea de transmisión es la encargada de conectar y desacoplar la estructura de alimentación altamente capacitiva con la estructura de apertura radiante. Esta conexión se realiza por medio del ensanchamiento suave y gradual del par paralelo de *striplines* sobre cada cara del sustrato hasta llegar y comenzar con la estructura radiante.

La transición entre la línea de transmisión y la estructura de apertura es un punto crítico en la elaboración de la antena, ya que un mal diseño puede provocar discontinuidades a frecuencias elevadas, lo que conlleva a un mal desempeño de la antena [20].



**Figura 1.11** Estructura Vivaldi antipodal [20].

### 1.3.4 TÉCNICAS DE MINIATURIZACIÓN PARA ANTENAS TSA

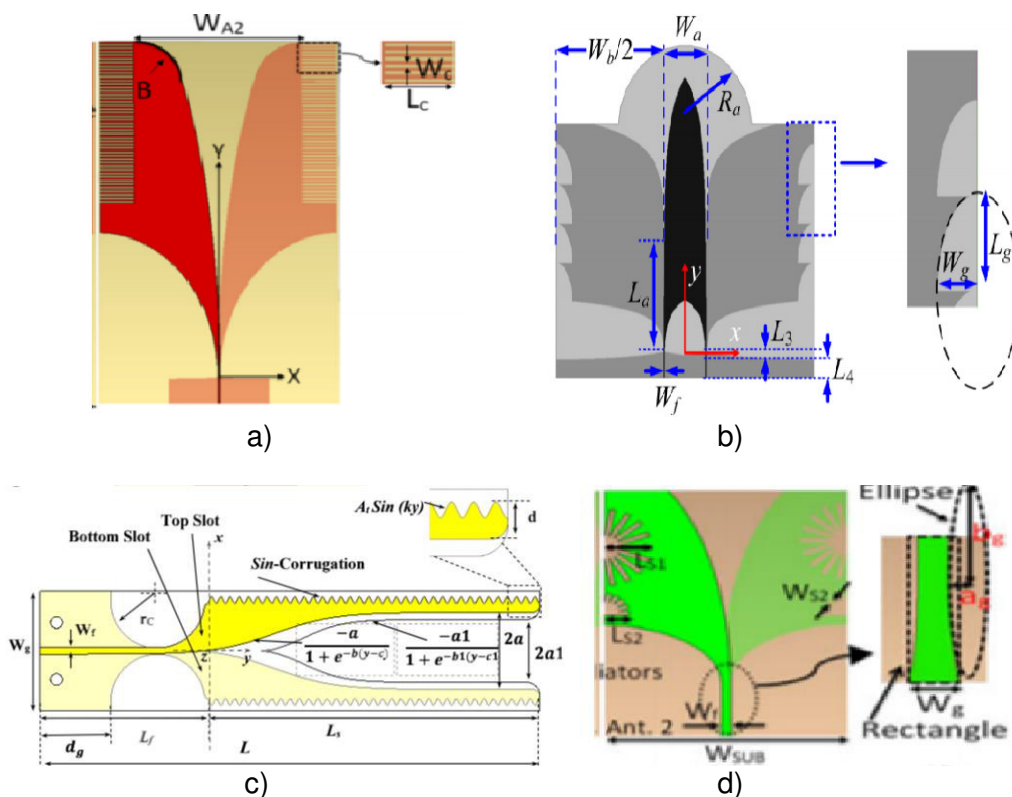
El avance en la tecnología electrónica ha exigido una considerable disminución en el tamaño de los componentes electrónicos requeridos para aplicaciones inalámbricas, debido a este hecho, existe una demanda en los sistemas de comunicación modernos para el diseño de antenas físicamente más pequeñas. El tamaño de la antena con respecto a la longitud de onda es el parámetro que tiene la mayor influencia sobre las características de radiación, con lo que el proceso de miniaturización se convierte en una tarea desafiante [21].

La miniaturización de las antenas se analiza usando los criterios típicos de antenas en miniatura tales como el ancho de banda, la frecuencia de operación, y el volumen de la antena. Las propiedades de la antena son comparadas en función de la reducción de tamaño y se comparan con las características radiantes de la misma antena pero sin la implementación de una técnica de miniaturización [21].

El tamaño relativamente grande de la TSA se origina por dos factores: el primero es por su elaborada estructura de alimentación, y el segundo, el requisito de que la longitud de la estructura radiante no debe ser menor a una longitud de onda a la frecuencia de operación [22]. En general entre las técnicas de miniaturización que se destacan para antenas TSA se tiene:

- Minimización de área basada en la distribución de corrientes superficiales.
- Implementación de corrugaciones por medio de ranuras en la estructura radiante.

Con el objetivo de miniaturizar y mantener el buen rendimiento de la antena, se han utilizado diversos métodos dentro de la técnica de corrugaciones que incluyen ranuras en formas de peine, corrugaciones elípticas, ondulaciones en forma de la función seno, configuraciones en forma de sol con ranuras rectangulares, etc., tal como se observa en la Figura 1.12 [23].



**Figura 1.12** Técnicas de miniaturización con implementación de corrugaciones  
a) Ranuras en formas de peine [24]. b) Corrugaciones elípticas [25]. c) Corrugaciones sinusoidales [6]. d) Corrugaciones en forma de sol con ranuras rectangulares [26].

## 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla el proceso de diseño, modelamiento y simulación de las estructuras propuestas dentro del presente proyecto de titulación.

### 2.1 ELECCIÓN DEL SUSTRATO

Como se mencionó en el capítulo anterior, dentro de la configuración de una antena TSA se incluye un material de soporte en el cual descansa tanto la estructura de alimentación (*microstrip*) como la estructura de apertura; dicho material es un sustrato dieléctrico

Para la elección del sustrato se debe contemplar dos principales características de este material [27]:

- **Espesor:** Un aumento del espesor produce un aumento de las pérdidas en el dieléctrico, así como un aumento de las ondas superficiales. Esto produce, por consiguiente, una disminución de la eficiencia de radiación de la antena.
- **Constante dieléctrica:** Si la constante dieléctrica es baja, mejora la eficiencia de radiación y provoca menos pérdidas en el dieléctrico.

Por las razones expuestas, se decide que para el diseño de las antenas se utilizará el sustrato Rogers RT/Duroid 5880, el cual se encuentra especificado en la librería del simulador y cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Principales características eléctricas y mecánicas del sustrato Rogers RT/Duroid 5880 [28].

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Espesor del sustrato	0,127 mm - 3,175 mm
Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )	2,2
Constante de pérdidas ( $\tan \delta$ )	0,0009
Espesor del conductor	8 $\mu\text{m}$ – 70 $\mu\text{m}$

## 2.2 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN POR TRANSICIÓN LÍNEA MICROSTRIP – SLOTLINE

En la presente sección, se detalla el proceso de diseño de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

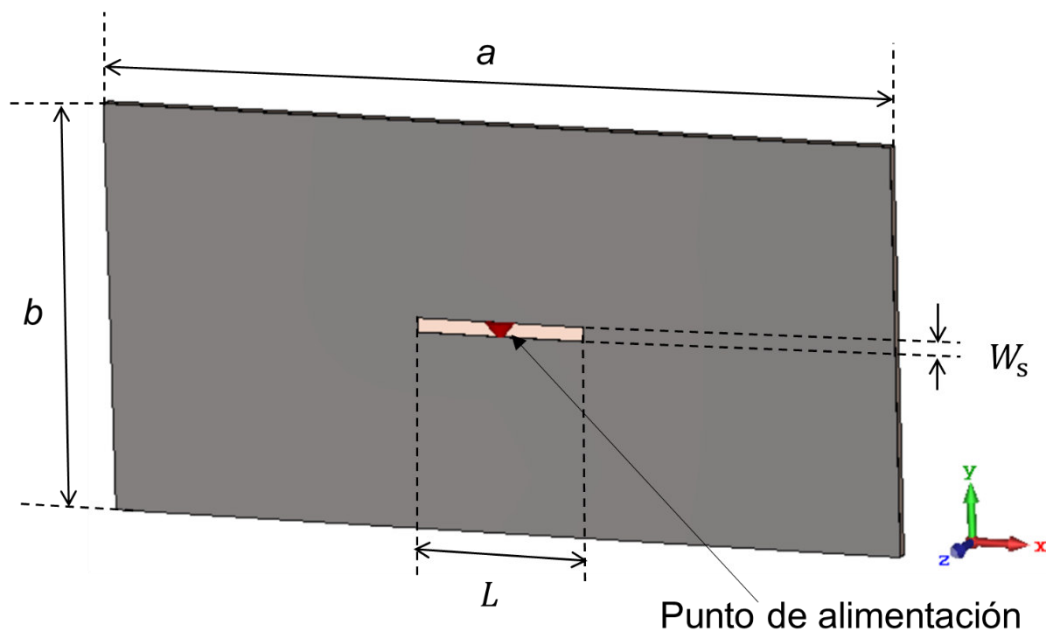
### 2.2.1 DISEÑO ANTENA SLOT (RANURA)

En la presente sección se presenta el diseño de una antena ranura, la cual será la base para la estructura de alimentación de la antena Vivaldi.

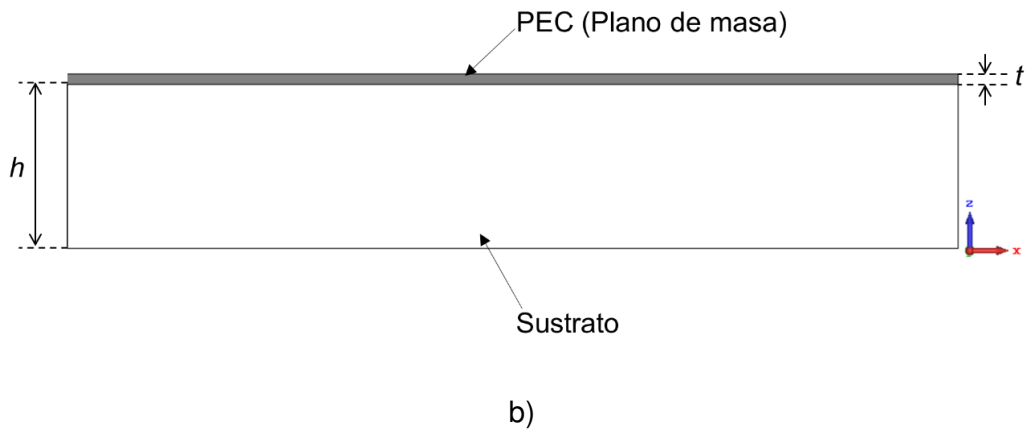
#### *Diseño del elemento radiante*

Con el objetivo de encontrar los valores adecuados del ancho y de la longitud de una línea *slot*, se diseña y simula una antena ranura. Esta estructura es diseñada para que circuitalmente tenga el punto más bajo de resonancia a la frecuencia de 30 GHz. Además, para la parte radiante, debido que a esta antena se la considera el complemento de un dipolo eléctrico, se procura que sus características de radiación se asemejen a las del dipolo, es decir, que la directividad sea un valor cercano a 2,16 dBi y que el patrón de radiación sea omnidireccional [1].

La estructura modelada de esta antena en CST Studio Suite se presenta en la Figura 2.1.



a)



**Figura 2.1** Antena ranura modelada en CST Studio Suite. a) Vista frontal. b) Vista lateral.

La antena modelada consiste en una capa rectangular, orientada en el plano XY, de sustrato Rogers RT/Duroid 5880 con dimensiones  $a \times b$  y de espesor  $h$ . Sobre el sustrato se apoya una lámina metalizada de material PEC (*Perfect Electric Conductor*) de iguales dimensiones rectangulares, pero con un espesor  $t$ ; esta capa hará la función de plano de masa. En el centro de la lámina, que corresponde al origen de las coordenadas, se realiza un corte rectangular de dimensiones  $L \times W_s$  que representan a la ranura, siendo  $L$  la longitud de la ranura y  $W_s$  el ancho de la ranura.

Es importante explicar que el parámetro de la longitud de la ranura ayudará a determinar el valor aproximado del cuarto de longitud de onda de una línea del tipo *slot*. Dicho valor es una de las definiciones que intervienen posteriormente en el diseño de alimentación de la antena Vivaldi. El cuarto de longitud de onda del *slot* que se representa con el parámetro QWS está dado en la ecuación (2.1)

$$QWS = \frac{L}{2} \quad (2.1)$$

Para la alimentación de esta estructura, se ubica en el punto medio de la ranura un puerto discreto con una impedancia de  $300 \Omega$ , ya que como se lo ha mencionado con anterioridad, esta estructura al ser el complemento de un dipolo tiene una impedancia de aproximadamente 4 veces la impedancia de un dipolo.

Cabe mencionar que los valores del ancho y del largo tanto del sustrato como del plano de masa, que corresponden a los parámetros  $a$  y  $b$  no son de relevancia en este diseño, ya que esta antena será simulada en condiciones de plano infinito, de tal manera que los resultados obtenidos se aproximen a los resultados teóricos. Las dimensiones de interés son las que conforman a la ranura.

En primer lugar, se determina la longitud ideal de la ranura  $L$ , para ello se utiliza el criterio de diseño de un dipolo eléctrico de media longitud de onda siendo  $\lambda_0 = 10$  mm; entonces la longitud de la ranura tiene un valor aproximado de  $L \approx \lambda_0/2 = 5$  mm.

Para el ancho de la línea *slot* se utiliza el criterio dado en la ecuación (2.2).

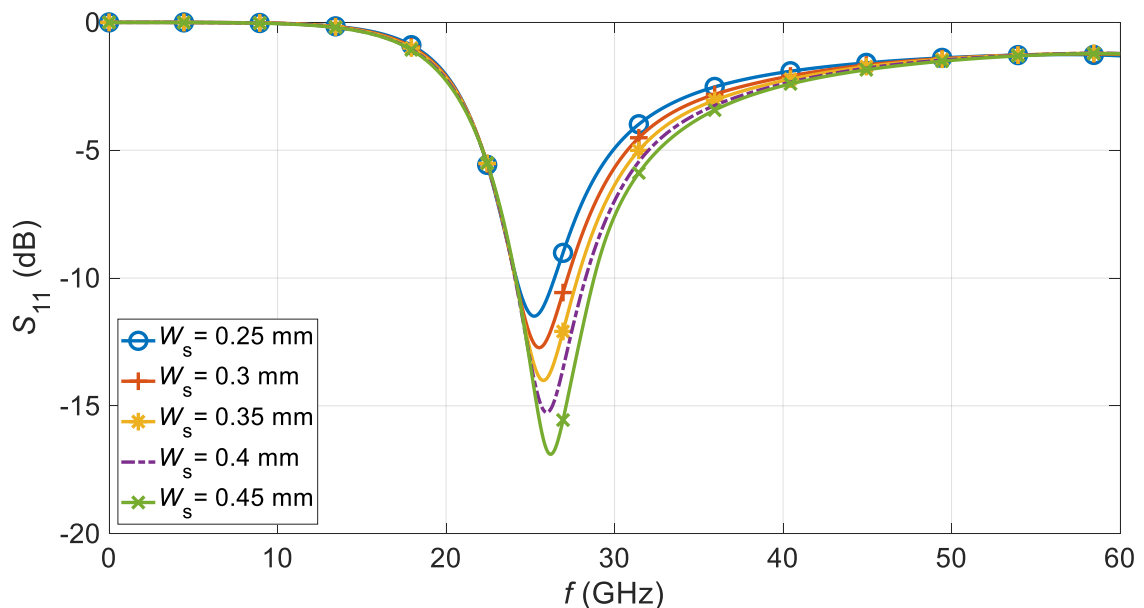
$$W_s \ll \lambda_s \quad (2.2)$$

El valor numérico del criterio presentado será que el ancho de la ranura deberá tener un valor cercano al 5% del valor de  $\lambda_s$ .

Con la ecuación (1.5) se determina que el valor de la longitud de onda guiada en la *slotline* es  $\lambda_s = 7,91$  mm; por ende, el ancho de la ranura tendrá un valor cercano a  $W_s \approx 0,4$  mm.

Para que la antena presente características radiantes semejante a las de su complemento es necesario que la estructura tenga un plano de masa infinito. Este requisito se configura en el simulador cuando los bordes del dominio de simulación tocan a la estructura en el plano XY (plano de la antena) y al configurar los límites en modo radiante (*open*).

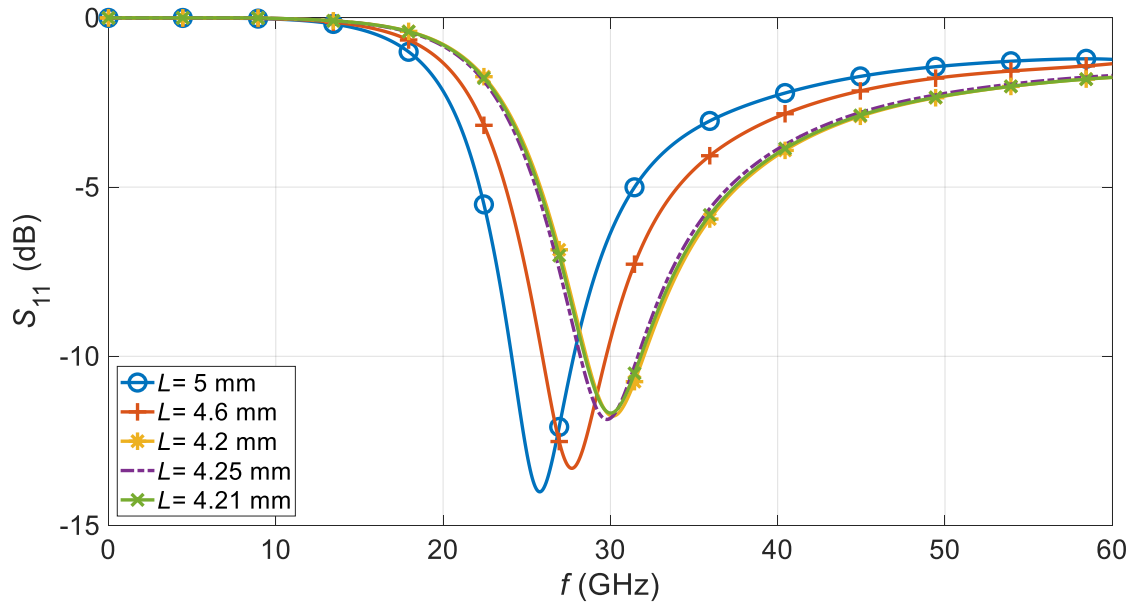
Con la asignación del valor de media longitud de onda en el espacio libre a la longitud de la ranura, empieza el primer estudio para esta estructura. Este estudio consiste en variar el ancho de la ranura según el criterio expuesto para esta dimensión. La Figura 2.2 indica la variación del parámetro  $S_{11}$  en función del valor del ancho de la ranura.



**Figura 2.2** Antena ranura. Parámetro  $S_{11}$ . Variación del ancho de la ranura ( $W_s$ ).

Al realizar el análisis, se escoge un valor para este parámetro con el cual la estructura, de una manera cualitativa, presente características circuitales adecuadas, y al mismo tiempo, un valor con el cual se obtenga adecuadas dimensiones para la alimentación.

Una vez definido el valor del ancho de la ranura, se variará el largo de la estructura para que la antena cumpla con los objetivos planteados. En la Figura 2.3 se observa la variación del parámetro  $S_{11}$  en función del valor de la longitud de la ranura.



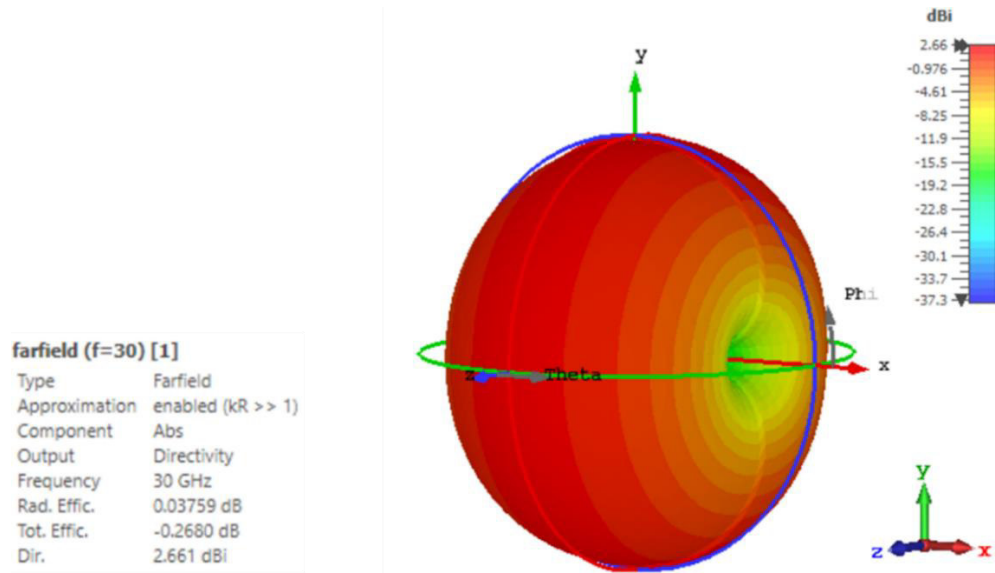
**Figura 2.3** Antena ranura. Parámetro  $S_{11}$ . Variación de la longitud de la ranura ( $L$ ).

Por medio del procedimiento realizado se determina que los valores apropiados para esta estructura son los mostrados en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Dimensiones de la antena Ranura.

Parámetro	Descripción	Valor (mm)
$h$	Espesor del sustrato	0,254
$t$	Espesor de la capa metálica	0,017
$L$	Longitud de la antena ranura	4,21
$W_s$	Ancho de la antena ranura	0,35

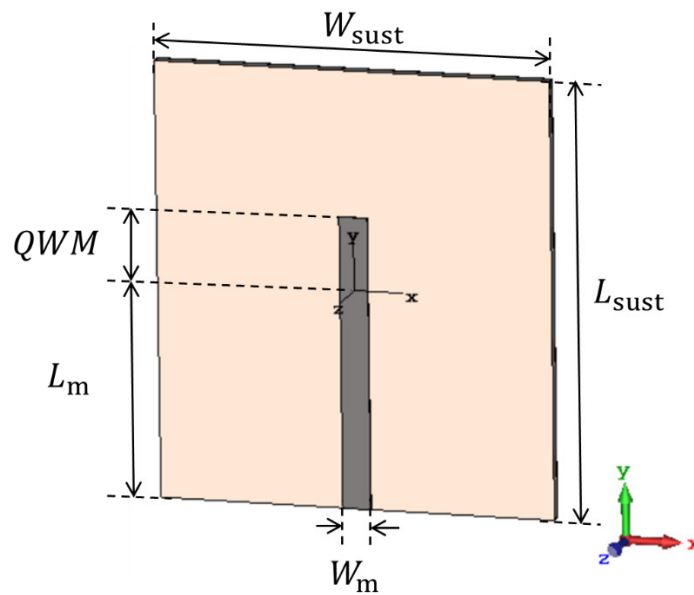
Con los valores detallados en la Tabla 2.2, en la Figura 2.4 se presenta el comportamiento radiante de la antena ranura.



**Figura 2.4** Antena ranura. Patrón de radiación.

#### *Diseño de la alimentación microstrip*

Mediante este diseño lo que se desea obtener principalmente es el valor del ancho de la línea *microstrip* para que la estructura tenga una impedancia característica de  $50 \Omega$ . Adicionalmente, determinar el efecto existente al variar la longitud de la línea *microstrip* con el fin de encontrar un valor aproximado que permita obtener un adecuado acoplamiento magnético con la *slotline* ya diseñada. La línea *microstrip* modelada se muestra en la Figura 2.5.



**Figura 2.5** Línea *Microstrip* modelada en CST Studio Suite.



Basándose en la sección 1.3.3, esta estructura constará de un plano de masa, que se orienta en el plano XY, de dimensiones  $W_{\text{sust}} \times L_{\text{sust}} \times t$ , y se compone de material PEC. Un sustrato Rogers RT/Duroid 5880 que posee las mismas dimensiones rectangulares, pero con un espesor  $h$ , y finalmente la línea *microstrip* PEC cuyas dimensiones son  $W_m \times (L_m + QWM)$  y espesor  $t$ . La alimentación de la *microstrip* se ubicará en un extremo de la línea mediante un puerto guía de onda; este puerto tendrá las dimensiones necesarias para que acapare todo el campo producido por el mismo, con el fin de excitar el modo fundamental de transmisión, sin excitar los otros modos de transmisión existentes.

Es necesario recalcar que el largo total de la *microstrip* se la dividirá en dos secciones que corresponden a los parámetros  $L_m$  y  $QWM$ . Este último parámetro es de especial importancia ya que actúa como un *stub* en el acoplamiento con la *slotline*

Por medio de optimización se determina que con el valor de  $W_m = 0,7126$  mm, se obtiene una impedancia de  $50 \Omega$  en la estructura.

Para el análisis relacionado con el parámetro  $L_m$ , se mantiene constante el valor del parámetro  $QWM$  y se simulará la dimensión  $L_m$  con valores múltiplos al cuarto de longitud de onda de la *microstrip* ideal. Para ello en el modelo se colocará la ecuación (2.3), la misma que relaciona a ambas variables.

$$L_m = j \times QWM \quad (2.3)$$

Donde  $j$  tomará valores enteros desde la unidad hasta siete, con el fin de que  $L_m$  cumplan la multiplicidad con  $QWM$ .

Mediante simulaciones y con la ayuda de monitores de campo magnético y de corriente superficial a la frecuencia de 30 GHz se logra establecer que, a medida que mayor sea el parámetro  $j$  se obtiene más regiones en donde existe concentración de campo magnético. Estas regiones de concentración de corriente aparecen a lo largo de la *microstrip* con una periodicidad aproximada de  $2 \times QWM$ , pero en todos los casos existe un máximo de corriente en la región que corresponde al origen, lugar donde se colocará en el diseño posterior la ranura.

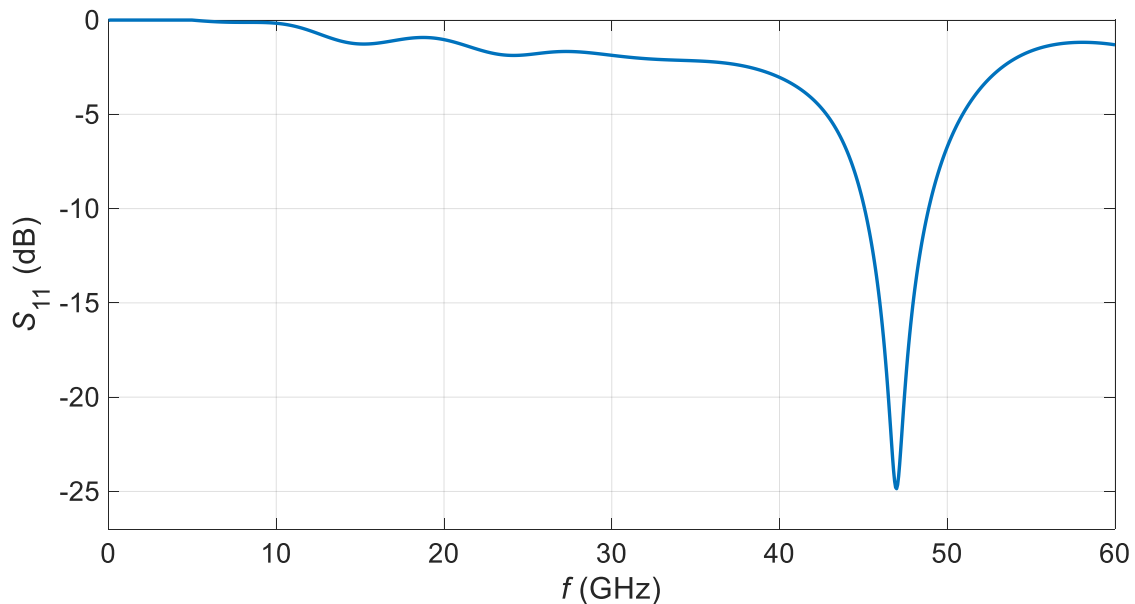
#### *Diseño de la Transición Microstrip-Slotline*

Con las componentes anteriores diseñadas independientemente, se procede a unir las para conformar la estructura de alimentación para esta antena.

El objetivo de este modelo será encontrar los valores óptimos para el largo de la *microstrip* ( $L_m$ ), el parámetro  $QWM$  y el parámetro  $QWS$  con el fin de obtener un *notch* a la frecuencia de 30 GHz.

En primer lugar, se simulará la estructura con los valores de los diseños realizados anteriormente para conocer el comportamiento circuital de la antena. Estos valores son:  $L_m = 3,64$  mm;  $QWM = 3,64$  mm;  $QWS = 2,105$  mm.

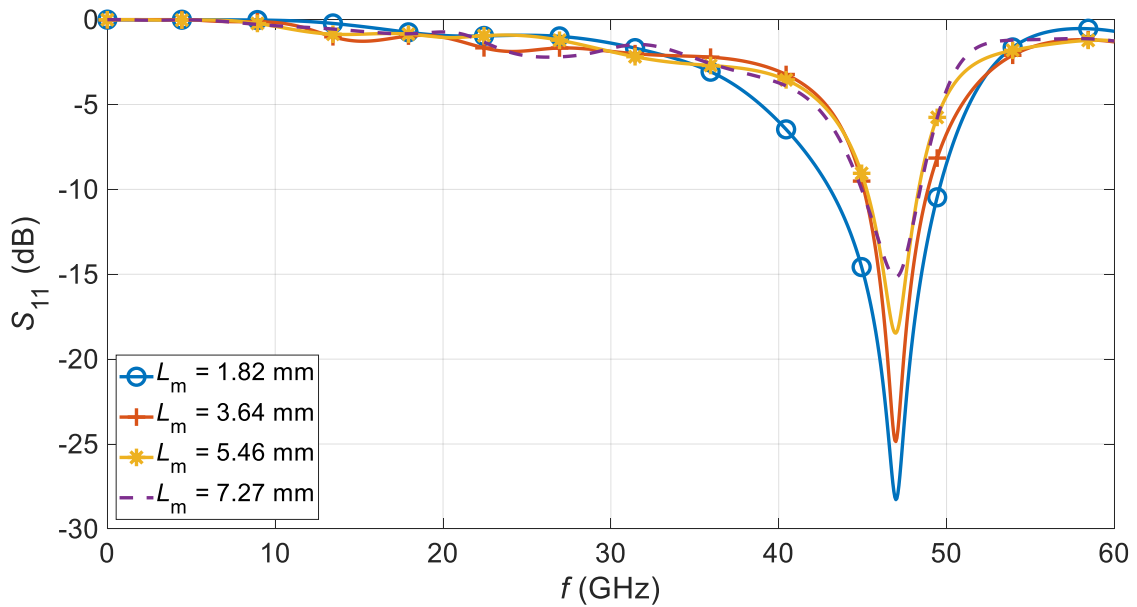
El comportamiento circuital de la estructura se presenta en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Parámetro  $S_{11}$ . Estructura de alimentación con dimensiones independientes.

Como se observa en la Figura 2.6 al integrar en una sola estructura las componentes simuladas de forma independiente, se obtiene una resonancia a 47 GHz. Debido a que no cumple con el objetivo planteado, es necesario modificar las dimensiones tanto de la línea *microstrip* como de la *slotline*.

Se analiza, en primer lugar, el efecto que se produce en el parámetro  $S_{11}$  al variar la longitud de la línea *microstrip* ( $L_m$ ); se varía el parámetro  $j$  y así se logra que  $L_m$  varíe desde un valor igual a un cuarto de longitud de onda de una *microstrip* hasta el valor de una longitud de onda de una *microstrip*. La Figura 2.7 muestra el coeficiente de reflexión en función de la variación realizada.

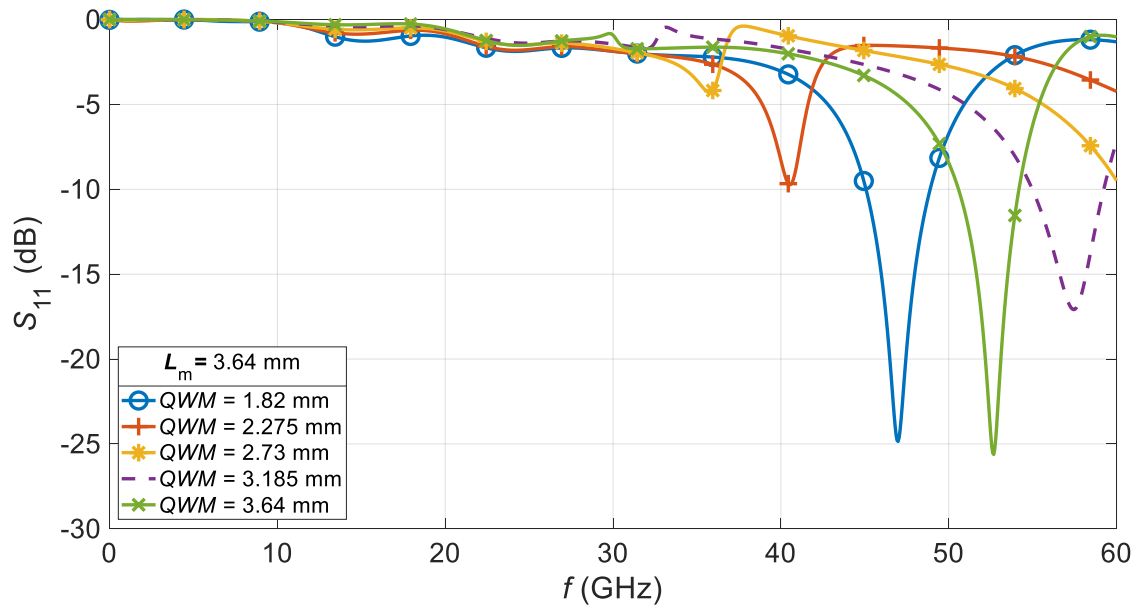


**Figura 2.7** Variación del parámetro  $L_m$  en la estructura de alimentación transición *microstrip-slotline*. Parámetro  $S_{11}$ .

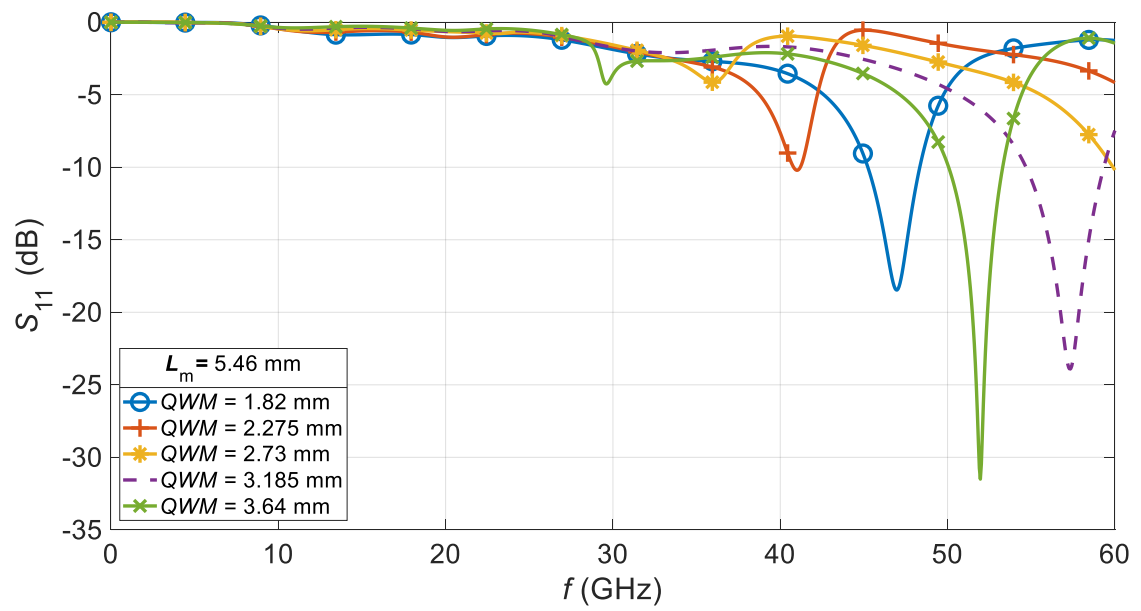
En la Figura 2.7 se observa que la variación de dicho parámetro mantiene la frecuencia cercana a 47 GHz, debido a ello se procede a variar el parámetro  $QWM$ .

Para análisis del parámetro  $QWM$ , se realiza simulaciones en donde se varía dicho parámetro desde el valor obtenido teóricamente hasta un valor correspondiente al doble de su valor original, obteniendo 5 simulaciones. Para este estudio se utilizará los últimos tres valores del parámetro  $L_m$  analizados anteriormente. La Figura 2.8 indica el comportamiento circuital de la estructura al variar el valor del parámetro  $QWM$  para los valores mencionados del parámetro  $L_m$ .

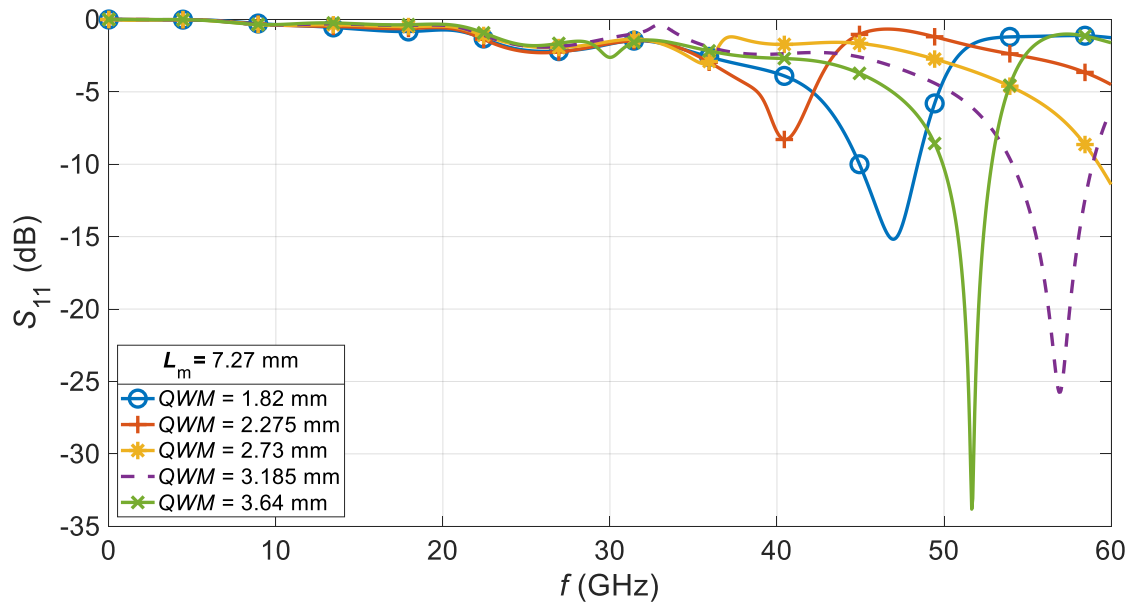
Al analizar la Figura 2.8, se observa que efectivamente el parámetro  $QWM$  es el que determina la frecuencia de operación. También se puede apreciar que mientras mayor sea la magnitud del parámetro  $L_m$  la estructura presenta un menor acoplamiento en las frecuencias que se acercan a 30 GHz; dicha razón es por la cual se decide trabajar con los valores de  $L_m$  correspondientes a la mitad y a la tres cuartas partes de la longitud de onda de la línea *microstrip*.



a)



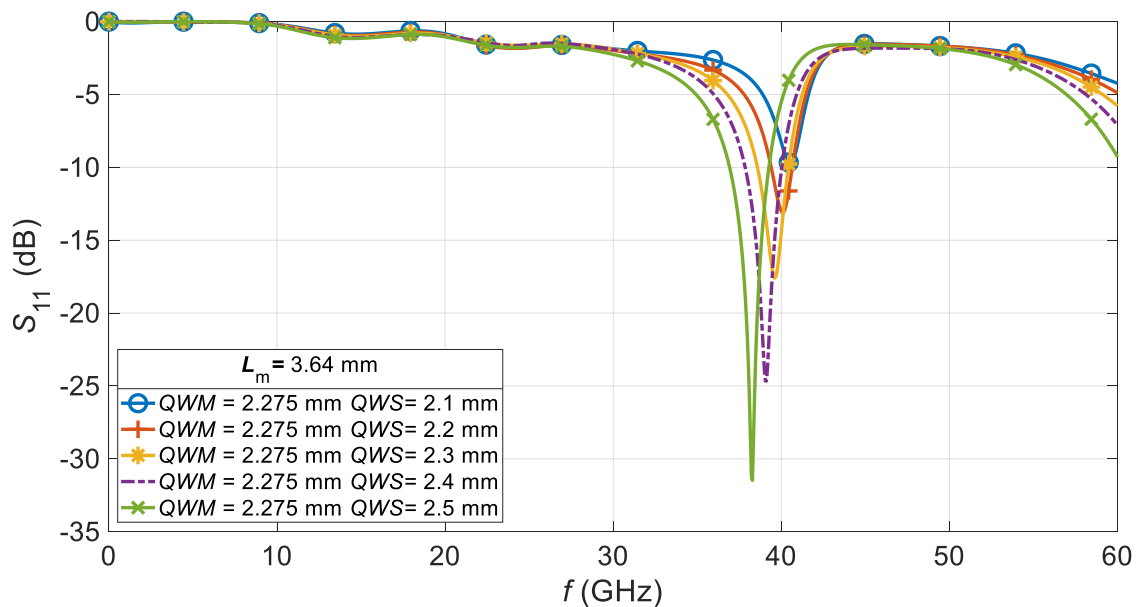
b)



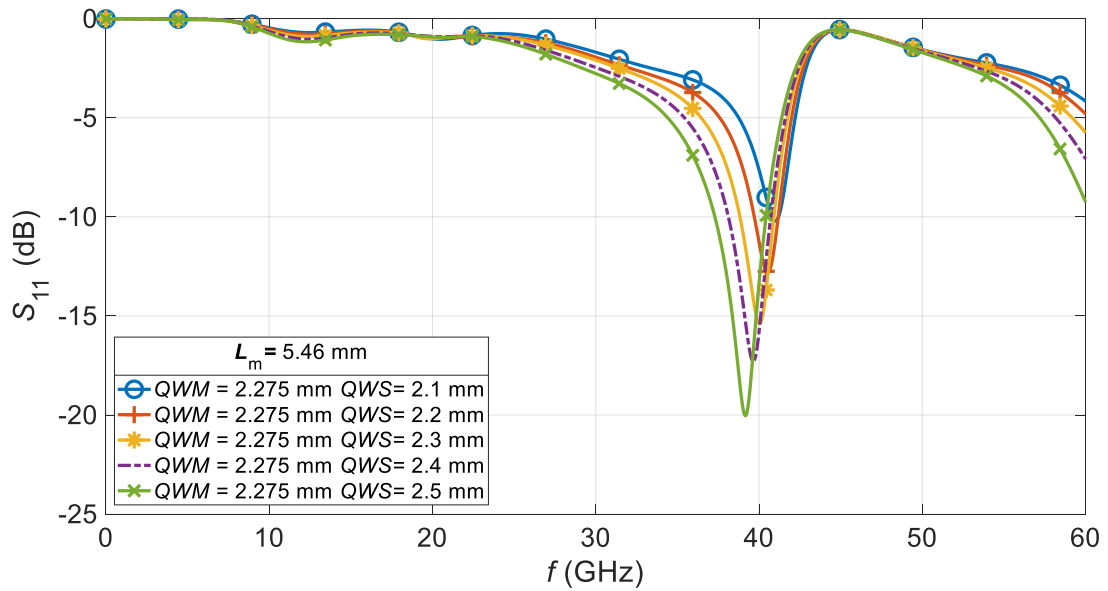
c)

**Figura 2.8** Variación del parámetro  $QWM$  en la estructura de alimentación transición *microstrip-slotline*. Parámetro  $S_{11}$ . a)  $L_m = 3,64$  mm. b)  $L_m = 5,46$  mm. c)  $L_m = 7,27$  mm.

A continuación, se estudia la variación del parámetro  $QWS$  para los valores del parámetro  $QWM$  que tiene un acoplamiento aceptable y que se encuentren más cercanos a la frecuencia de 30 GHz, es decir para el valor de 2,275 mm. La Figura 2.9 indica el comportamiento circuital de la estructura al realizar el estudio de la variación del parámetro  $QWS$ .



a)



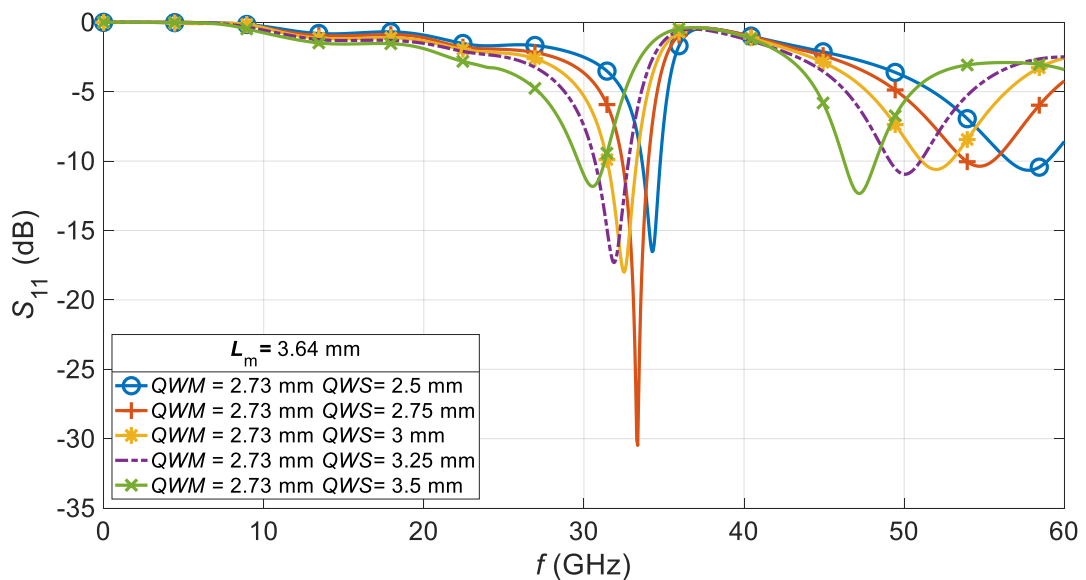
b)

**Figura 2.9** Variación del parámetro  $QWS$  con  $QWM = 2,275$  mm. Parámetro  $S_{11}$ .

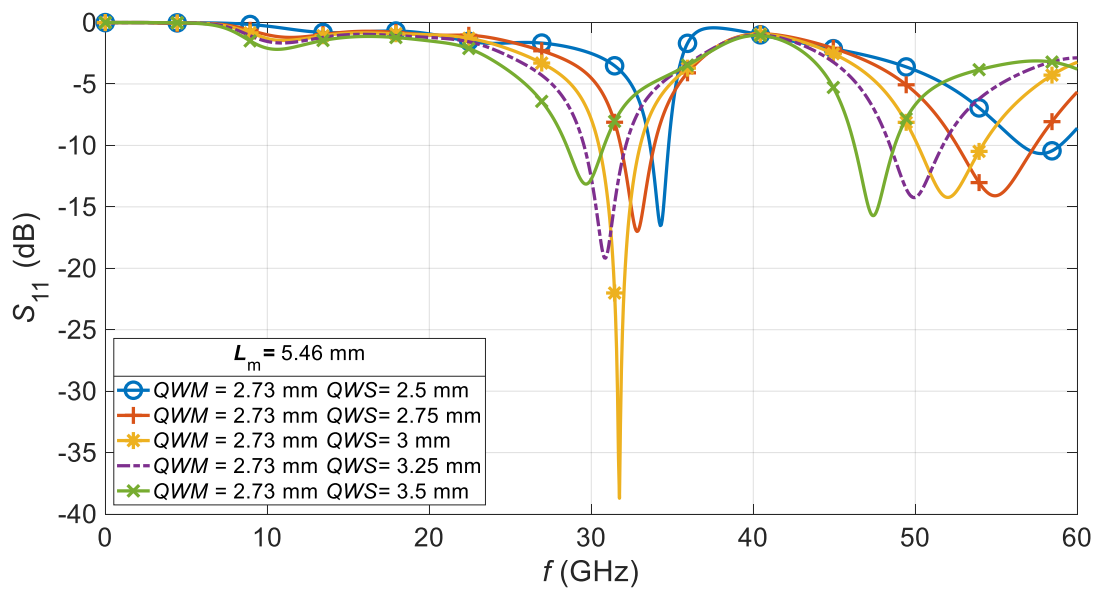
a)  $L_m = 3,64$  mm. b)  $L_m = 5,46$  mm.

Como se observa en la Figura 2.9 al aumentar el valor del parámetro  $QWS$ , el acoplamiento mejora y al mismo tiempo se logra disminuir la frecuencia de operación de la estructura.

En base a la tendencia que se observa al varia la longitud del *slot*, se procede a realizar una nueva variación del parámetro  $QWS$ , pero esta vez en el *notch* que se produce cuando el valor de  $QWM$  es 2,73 mm. La Figura 2.10 muestra la variación del parámetro  $S_{11}$  en función del valor del parámetro  $QWS$ .



a)



b)

**Figura 2.10** Variación del parámetro QWS con  $QWM = 2,73$  mm. Parámetro  $S_{11}$ .

a)  $L_m = 3,64$  mm. b)  $L_m = 5,46$  mm.

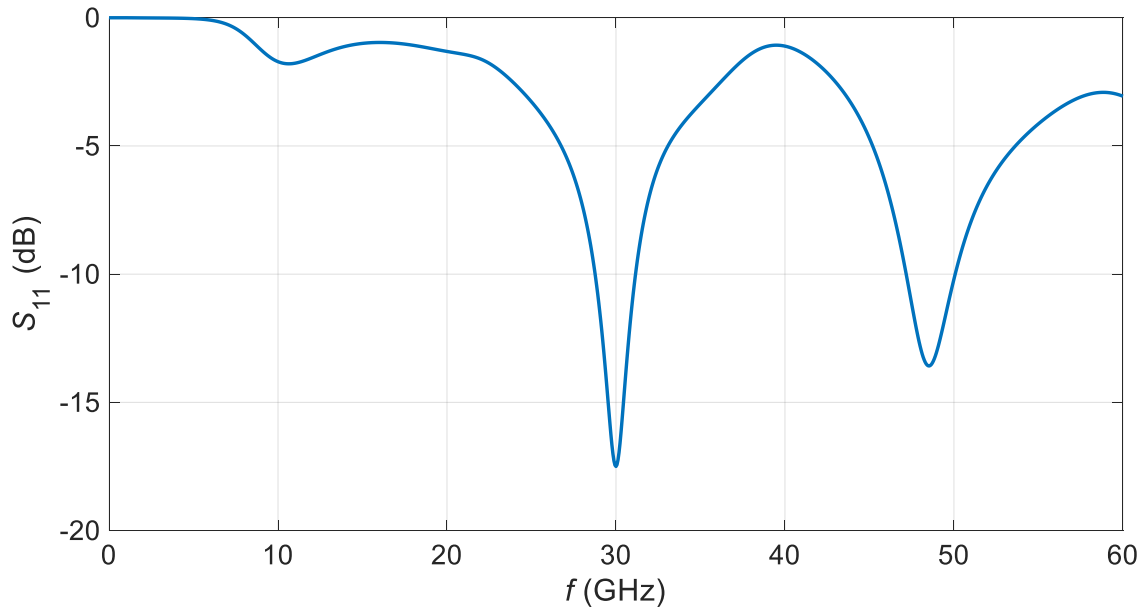
Al analizar las gráficas, se determina que para la Figura 2.10 a), es necesario aumentar aún más la longitud de la línea *slot* para obtener un *notch* a 30 GHz, con el riesgo de que el acoplamiento no sea bueno. Por otro lado, en la Figura 2.10 b) se tiene un mejor acoplamiento para el *notch* cercano a 30 GHz y no es necesario aumentar más la longitud de la *slotline*. Es por eso que se realizará las modificaciones necesarias para obtener un *notch* a la frecuencia de interés y que la estructura presente un valor de acoplamiento aceptable. Para ello se trabajará con el valor de  $L_m$  que corresponde al 75% del valor de la longitud de onda de la línea *microstrip*.

Por medio del procedimiento detallado en esta sección, los valores óptimos conseguidos para esta estructura se muestran en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Dimensiones estructura de alimentación transición *microstrip-slotline*.

Parámetro	Descripción	Valor (mm)
$L_m$	Longitud de la línea <i>microstrip</i>	5,53
$W_m$	Ancho de la línea <i>microstrip</i>	0,7126
$QWM$	Radio del <i>stub</i> de la línea <i>microstrip</i>	2,8
$W_s$	Ancho de la <i>slotline</i>	0,35
$QWS$	Radio del <i>stub</i> de la <i>slotline</i>	3,3

Con los valores indicados en la tabla, se obtiene la Figura 2.11 que representa el comportamiento circuital que presenta estructura de alimentación transición *microstrip- slotline*.



**Figura 2.11** Estructura de alimentación transición *microstrip-slotline*. Parámetro  $S_{11}$ .

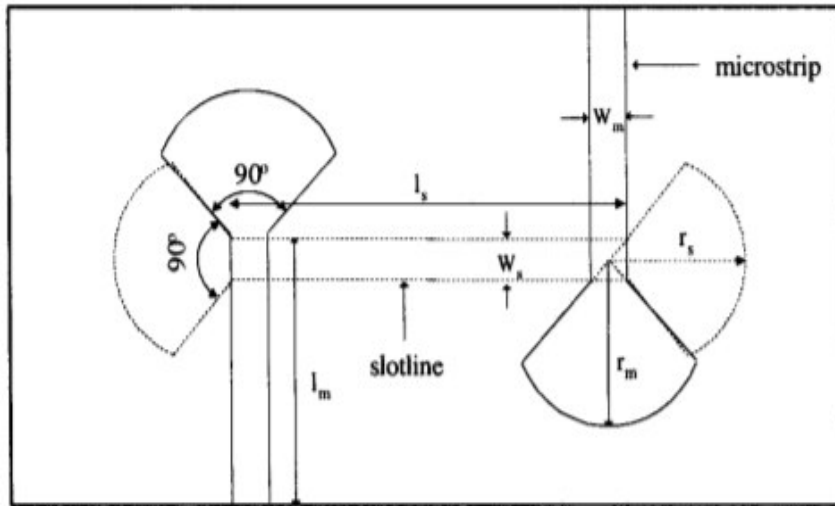
#### *Diseño de la Transición Microstrip-Slotline con Stubs Radiales*

Para la estructura de alimentación, se opta por una terminación radial en sus *stubs* con el propósito de aumentar el ancho de banda de operación de la antena [1]. Debido a que al implementar la alimentación con *stubs* rectangulares a la estructura de apertura de la antena Vivaldi, no se logra un ancho de banda relativo que permita definir al elemento radiante como antena de banda ancha.

El objetivo del diseño a realizar será encontrar las dimensiones de los radios de los *stubs*, los cuales corresponden al cuarto de longitud de onda tanto para la *microstrip* (*QWM*) como para la *slotline* (*QWS*). Con estos parámetros se busca obtener un *notch* que acapare la frecuencia de 30 GHz y que a esta frecuencia se tenga un valor aceptable en los parámetros de acoplamiento y de transmitancia. Además, con esta estructura se busca determinar la influencia en términos circuitales que provoca la variación del ángulo de los *stubs* en el diseño, con ello, encontrar el valor óptimo de este parámetro.

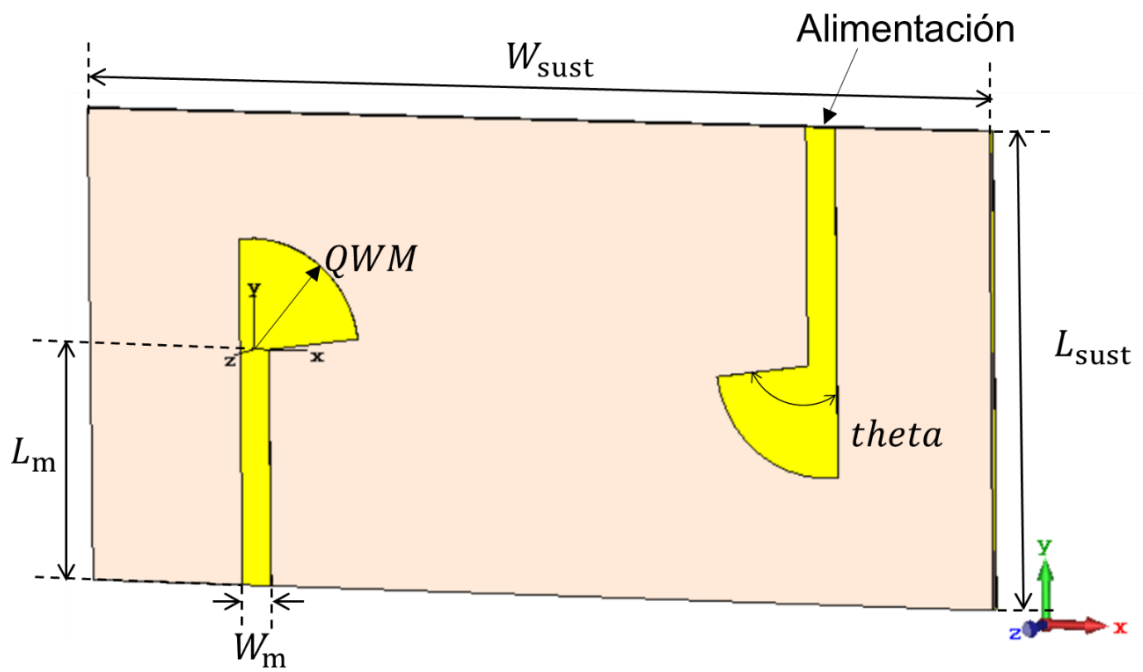
El diseño a realizar se basará en el modelo de doble transición *microstrip-slotline* que se indica en la Figura 2.12.



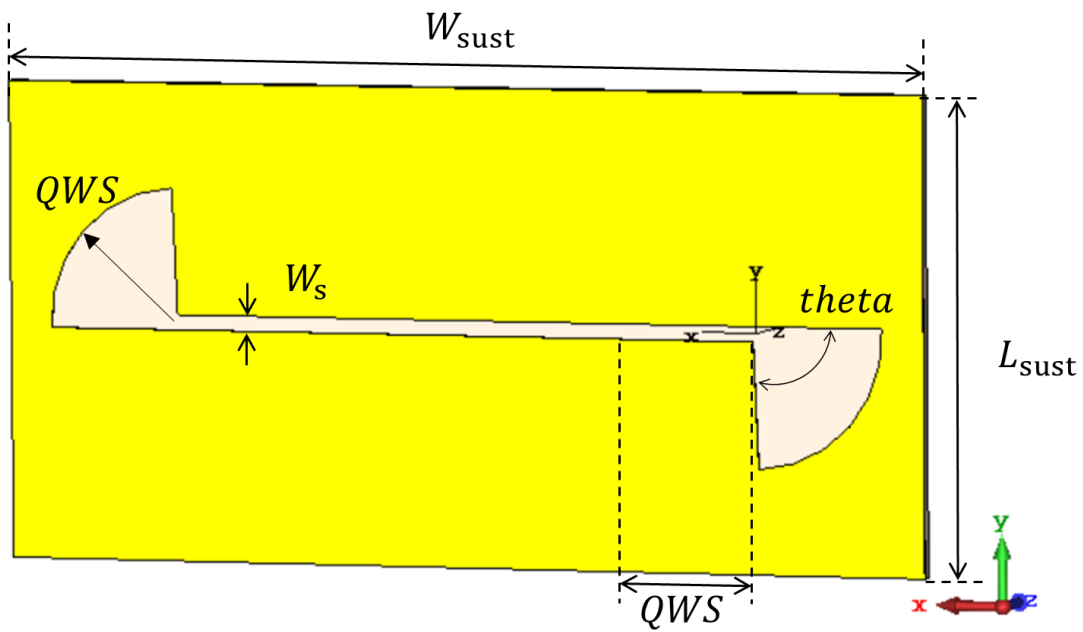


**Figura 2.12** Modelo doble transición *microstrip-slotline* [18].

La Figura 2.13 presenta la estructura de doble transición *microstrip-slotline* modelada en CST Studio Suite.



a)



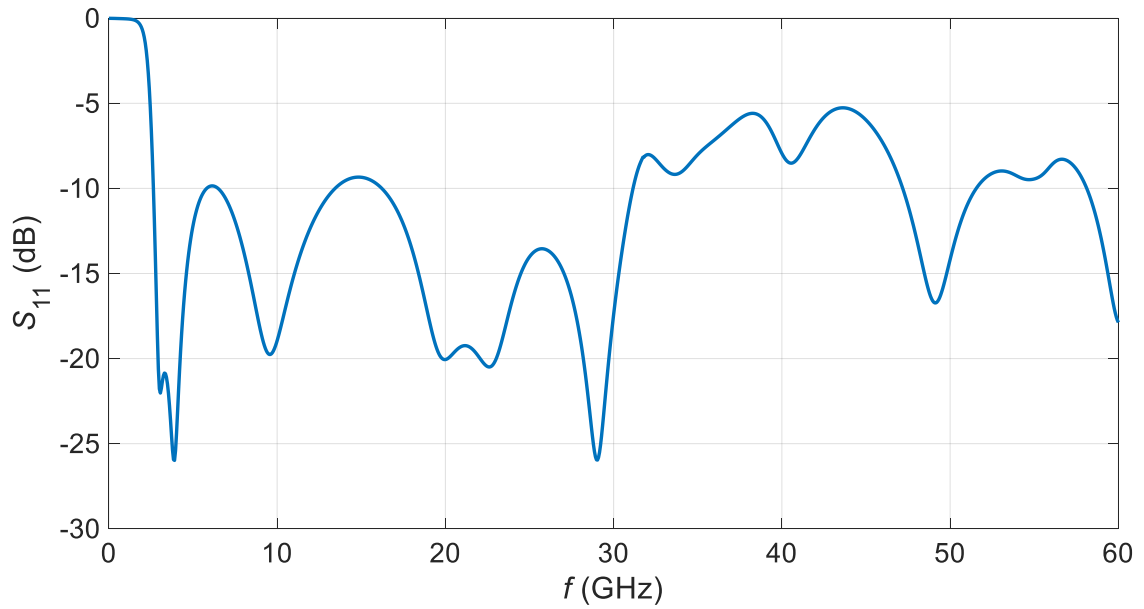
b)

**Figura 2.13** Estructura doble transición *microstrip-slotline* modelada en CST Studio  
Suite a) Vista frontal. b) Vista posterior.

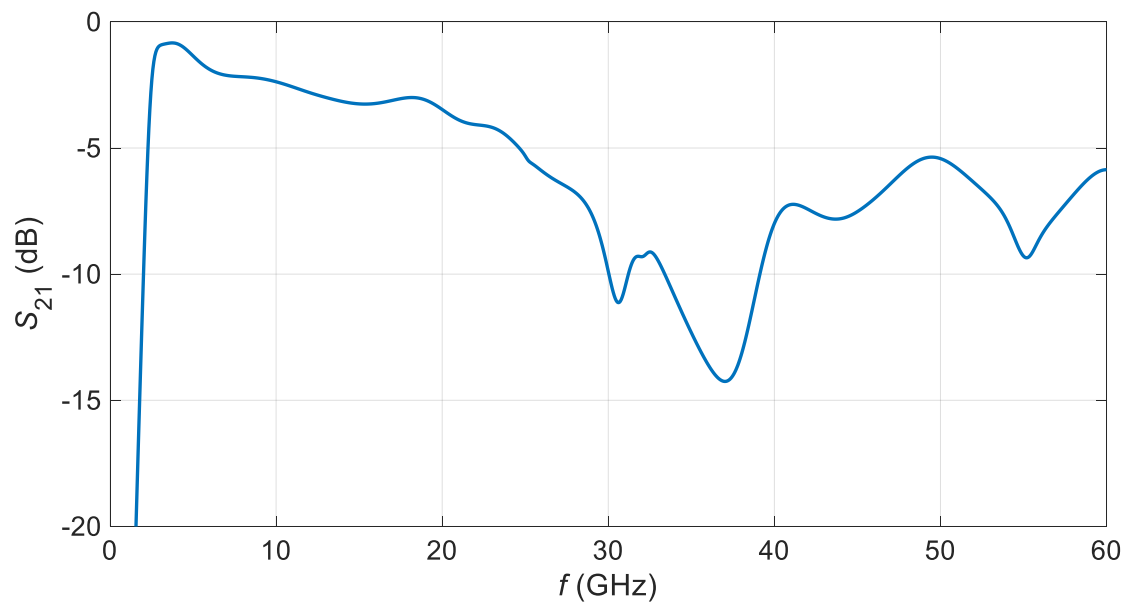
La estructura consta de una capa de sustrato de espesor  $h$  y de dimensiones rectangulares que varían en función de los valores que componen a los parámetros que conforman la transición de campos. En una de las caras del sustrato se ubica un par de líneas *microstrip* equidistantes entre sí en el eje X con dimensiones  $W_m \times L_m \times t$  que poseen en uno de sus extremos un *stub* radial de radio  $QWM$  y ángulo  $theta$ . En la cara opuesta del sustrato se coloca una lámina metálica de espesor  $t$  con una grabación correspondiente al *slot* con terminación radial. La línea *slot* tendrá unas dimensiones  $QWS \times W_s$ , su *stub* radial posee un radio  $QWS$  y el mismo ángulo  $theta$ .

Para la configuración del dominio de simulación se toma en cuenta que esta estructura es no radiante y que se requiere un ahorro en los tiempos de simulación. A diferencia de las estructuras modeladas en diseños anteriores, la estructura actual no tiene planos de simetría.

La metodología de diseño para esta alimentación empieza con la simulación de la estructura con los valores de sus parámetros detallados en la Tabla 2.3. La Figura 2.14 indica el comportamiento circuital que presenta la estructura al utilizar los valores mencionados.



a)

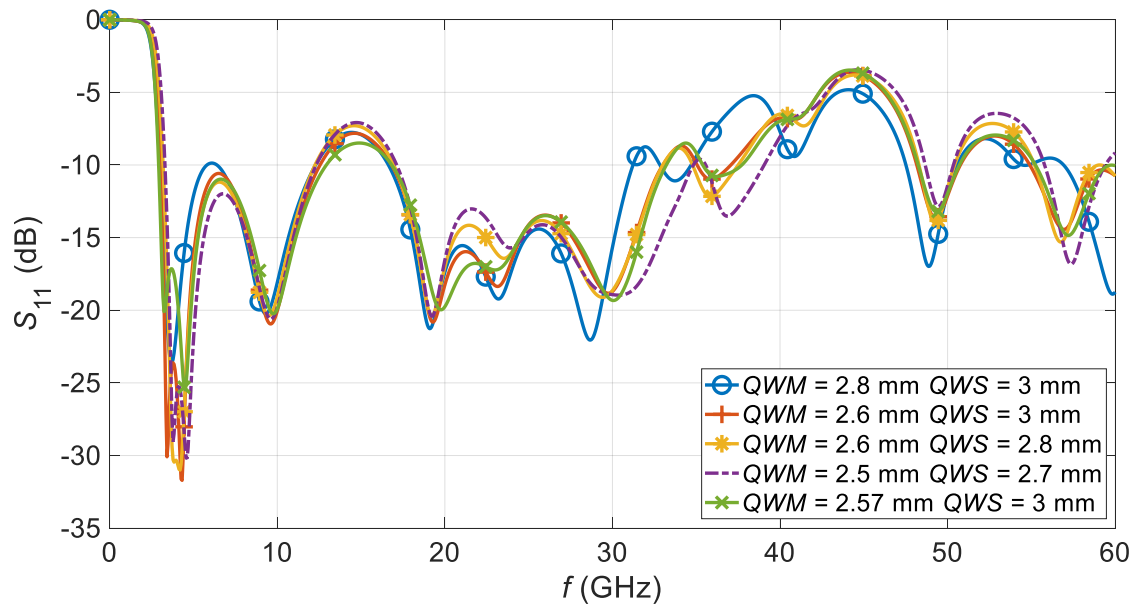


b)

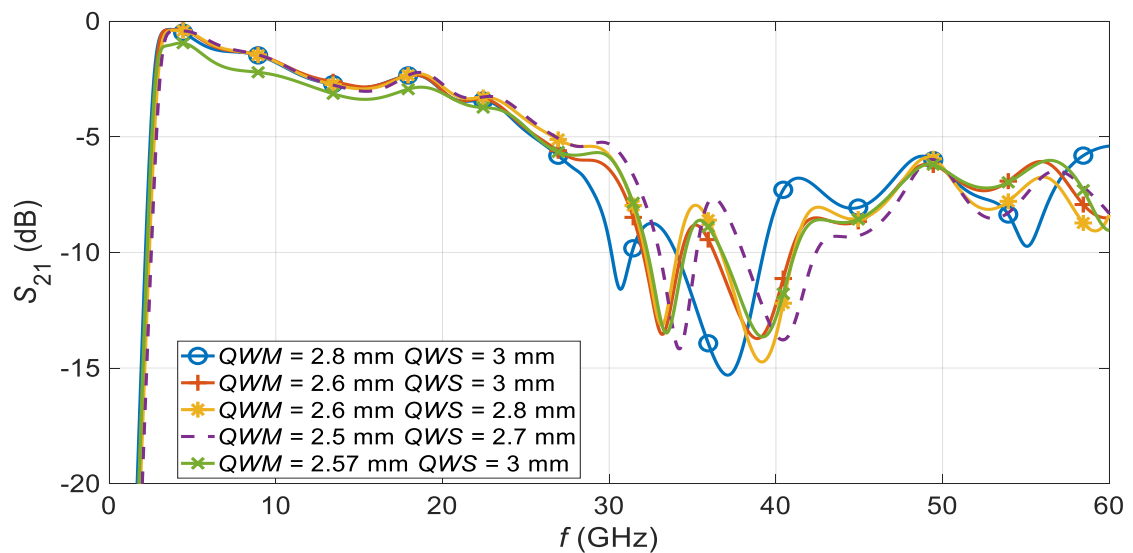
**Figura 2.14** Estructura de alimentación con *stubs* radiales. a)  $S_{11}$ . b)  $S_{21}$ .

Al analizar la Figura 2.14 a), se observa que existe un *notch* cercano a la frecuencia de interés cuyo valor de acoplamiento es aceptable, pero al analizar el parámetro  $S_{21}$  se aprecia que las pérdidas de transmisión son altas ya que su valor se sitúa alrededor de -10 dB a la frecuencia de 30 GHz

En la Figura 2.15 se observa las diferentes simulaciones realizadas, en la cuales se varía los valores de los radios de los *stubs*.



a)

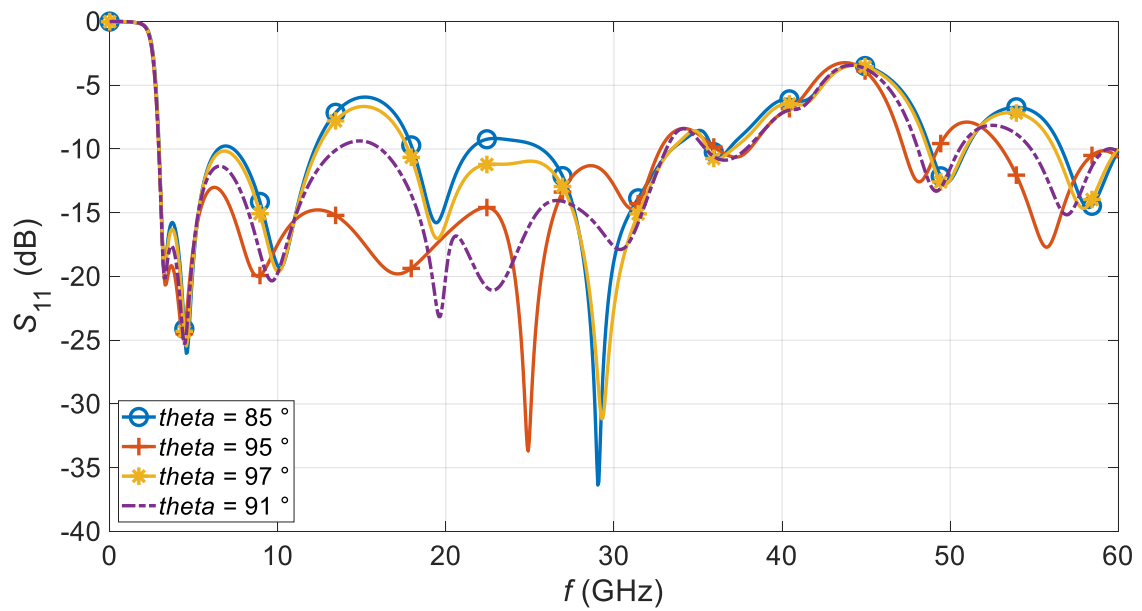


b)

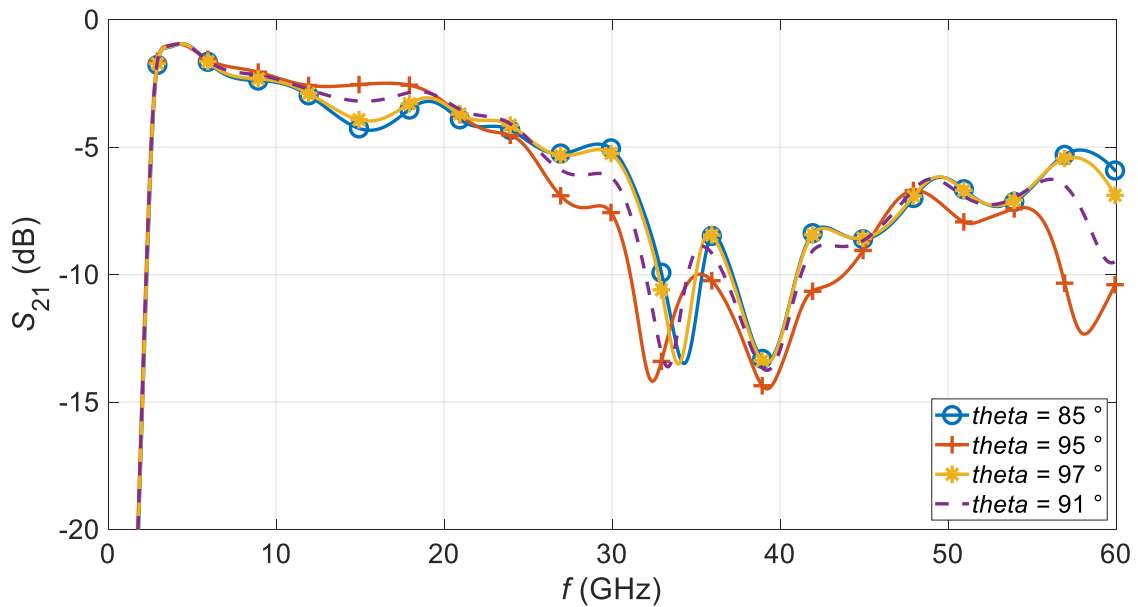
**Figura 2.15** Estructura de alimentación con *stubs* radiales. Variación de los parámetros *QWM* y *QWS*. a)  $S_{11}$ . b)  $S_{21}$ .

Al analizar las gráficas presentadas en la Figura 2.15 se escoge los últimos valores para los parámetros estudiados, ya que con ellos se logra que la estructura opere a 30 GHz, además la estructura presenta pérdidas de retorno mínimas.

Una vez determinados los valores del radio de los respectivos *stubs*, se estudia la influencia de variar el ángulo de los *stubs*. La Figura 2.16 ilustra la variación del parámetro en función a los valores que presenta el ángulo de los *stubs*.



a)



b)

**Figura 2.16** Estructura de alimentación con *stubs* radiales. Variación del ángulo  $\theta$ .

a)  $S_{11}$ . b)  $S_{21}$ .

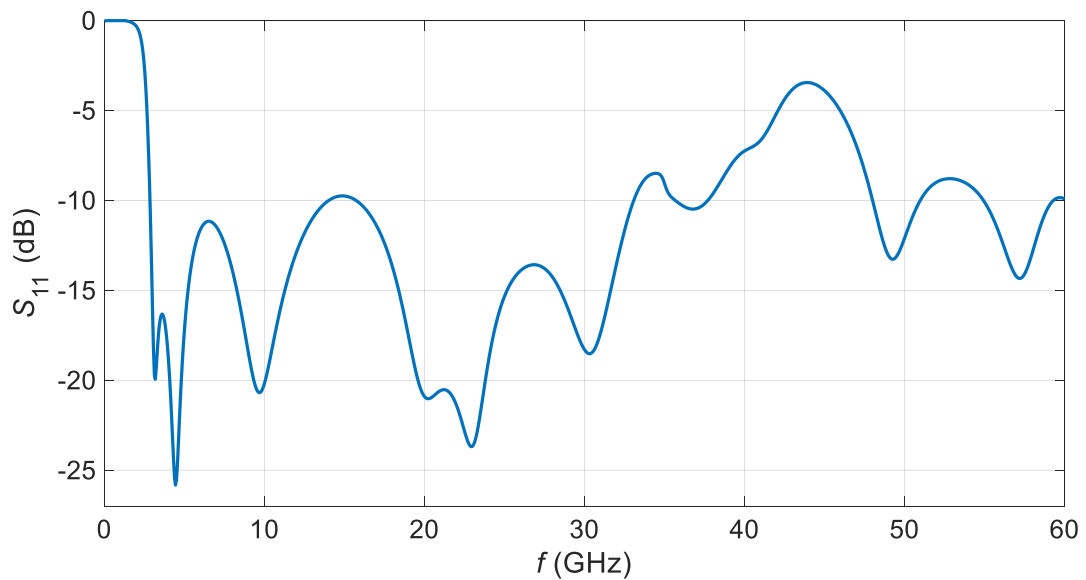
Con el análisis efectuado sobre el ángulo de los *stubs*, se establece que el valor de  $91^\circ$  para este parámetro es con el cual se presenta las mejores características circuitales, ya que con dicho ángulo el ancho de banda de la estructura es amplio en comparación con los otros valores estudiados. Seguidamente se procede a modificar nuevamente los valores de los radios de los *stubs* para este nuevo ángulo.

Por medio de la metodología expuesta para esta estructura, se detalla en la Tabla 2.4. los valores más adecuados para los parámetros que intervienen en esta estructura de alimentación.

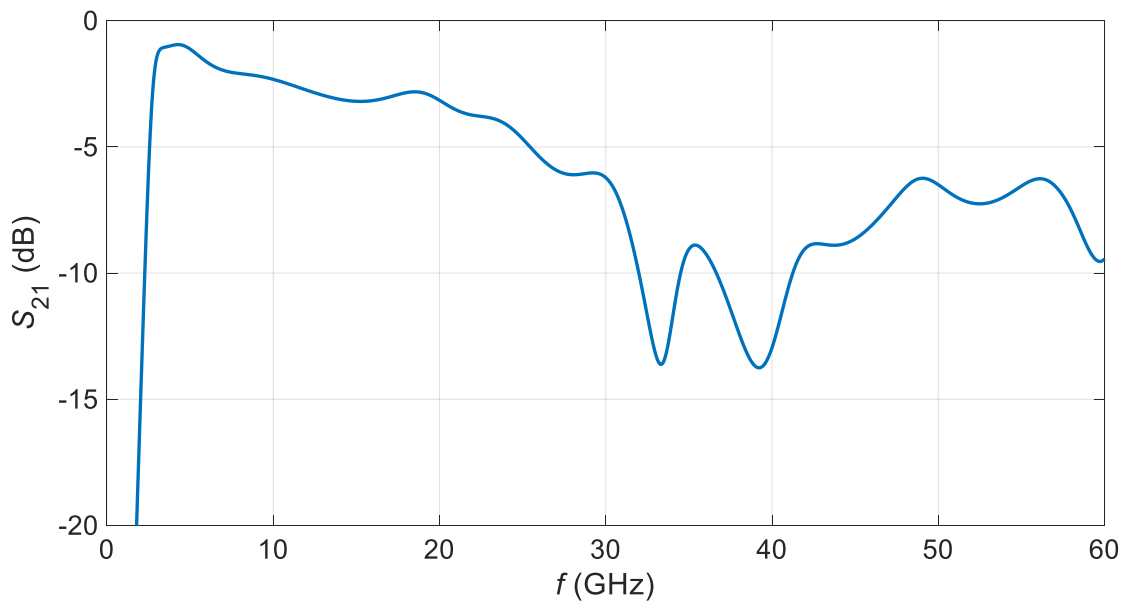
**Tabla 2.4** Dimensiones estructura de Alimentación Transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales.

Parámetro	Descripción	Valor
$L_m$	Longitud de la línea <i>microstrip</i>	5,53 mm
$W_m$	Ancho de la línea <i>microstrip</i>	0,7126 mm
$QWM$	Radio del <i>stub</i> de la línea <i>microstrip</i>	2,57 mm
$W_s$	Ancho de la <i>slotline</i>	0,35 mm
$QWS$	Radio del <i>stub</i> de la <i>slotline</i>	3,1 mm
$theta$	Angulo del <i>stub</i> radial	91°

Con los valores presentados en la Tabla 2.4, la estructura de alimentación presenta el comportamiento circuital que se observa en la Figura 2.17



a)



b)

**Figura 2.17** Estructura de alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales.

a)  $S_{11}$ . b)  $S_{21}$ .

## 2.2.2 DISEÑO DE ESTRUCTURA DE APERTURA - ANTENA VIVALDI

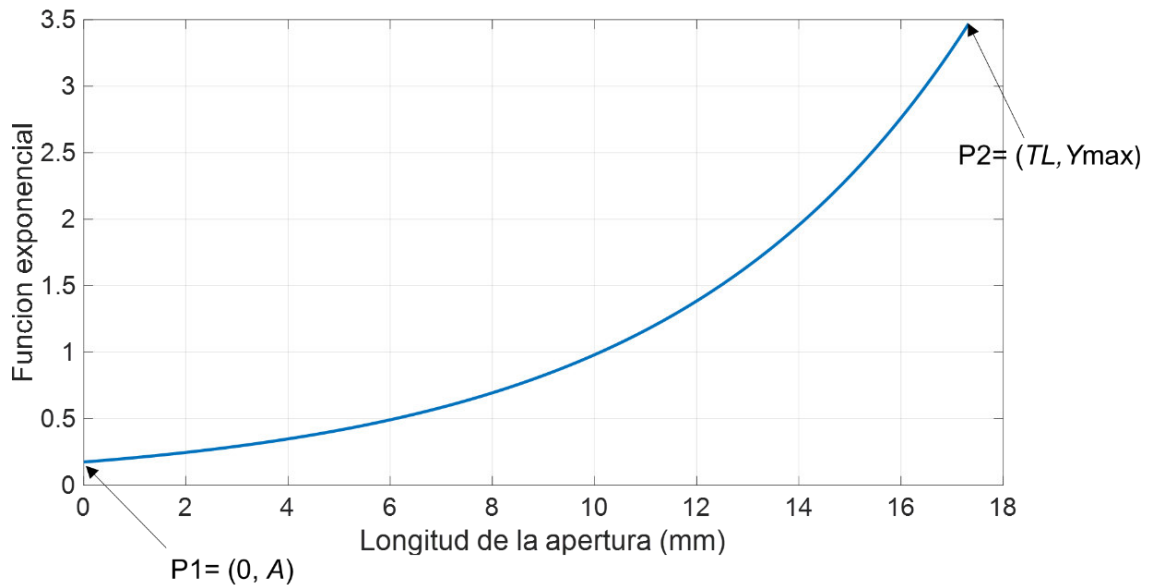
Con la estructura de alimentación ya diseñada, se procede a incorporar la parte radiante para conformar la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

La estructura de apertura de la Vivaldi viene dada por una función exponencial [1], la misma que se expresa en la ecuación (2.4).

$$y(t) = \pm A \times e^{p \times t} \quad (2.4)$$

La curva exponencial que representa a la ecuación (2.4) se visualiza en la Figura 2.18.

Como se observa en la Figura 2.18, la curva exponencial se define mediante dos puntos. El primero de ellos se ubica en las coordenadas 0 en el eje X y A en el eje Y; estas coordenadas son conocidas ya que la variable A corresponde a la mitad del valor del parámetro  $W_s$ . Para las coordenadas del segundo punto se tiene en el eje X el parámetro TL el cual representa la longitud de la apertura; y en el eje Y se tiene el parámetro  $Y_{max}$  que representa la mitad de la anchura final de la apertura de la antena.



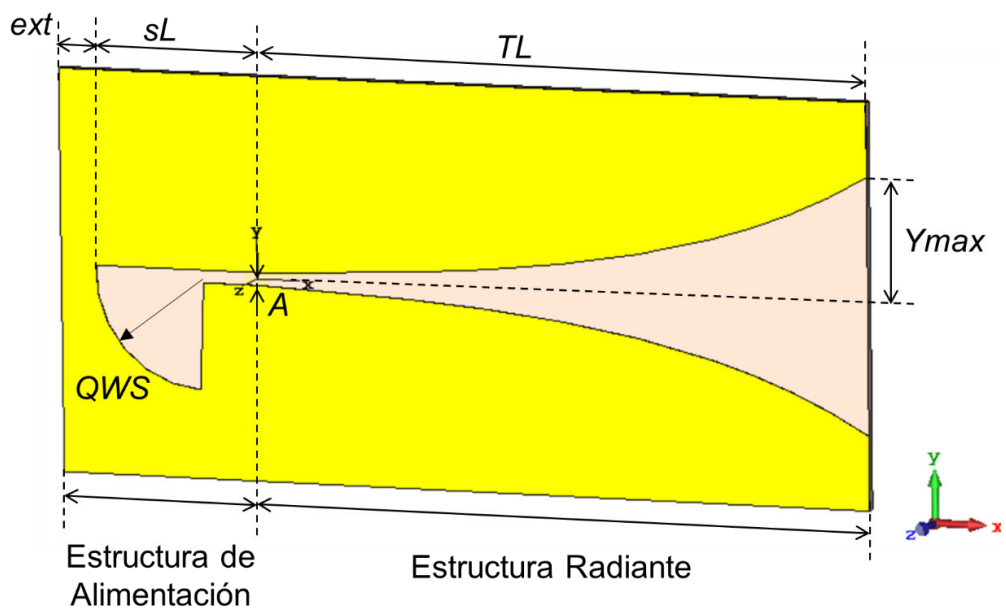
**Figura 2.18** Ecuación exponencial que representa a la apertura de la Antena Vivaldi con transición *microstrip-slotline*.

El modelo se centrará en encontrar los valores de las coordenadas del segundo punto para definir la curva de apertura exponencial de la Vivaldi, con el fin de que la estructura completa sea catalogada como antena de banda ancha (ancho de banda relativo sea mayor igual al 20%) y además, obtener un *notch* con el punto mínimo de resonancia en la frecuencia de 30 GHz. Por otra parte, desde el punto de vista radiante, se busca conseguir que la antena presente buenas características en su directividad y ganancia

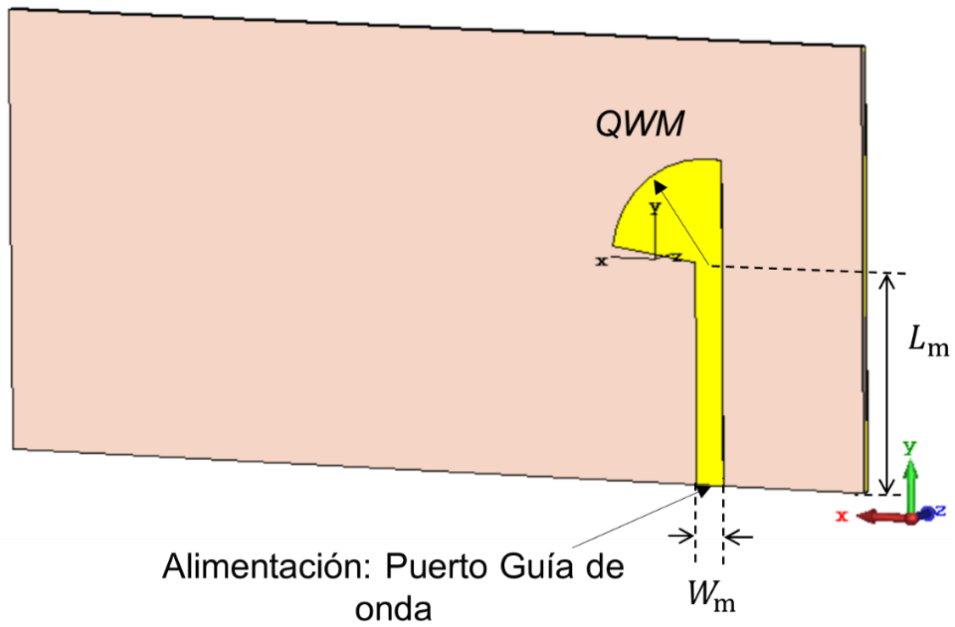
En la Figura 2.19 se presenta la Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip- slotline* modelada.

La estructura presentada en la Figura 2.19 es la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*; se observa que, la estructura está dividida en dos secciones, la sección correspondiente a la alimentación que se extiende desde el origen de coordenadas hacia la parte negativa del eje X, a la cual se le aplicará cambios insignificantes. La otra sección corresponde a la estructura de apertura, la cual empieza desde el origen de coordenadas y se extiende en dirección del eje X positivo.





a)



b)

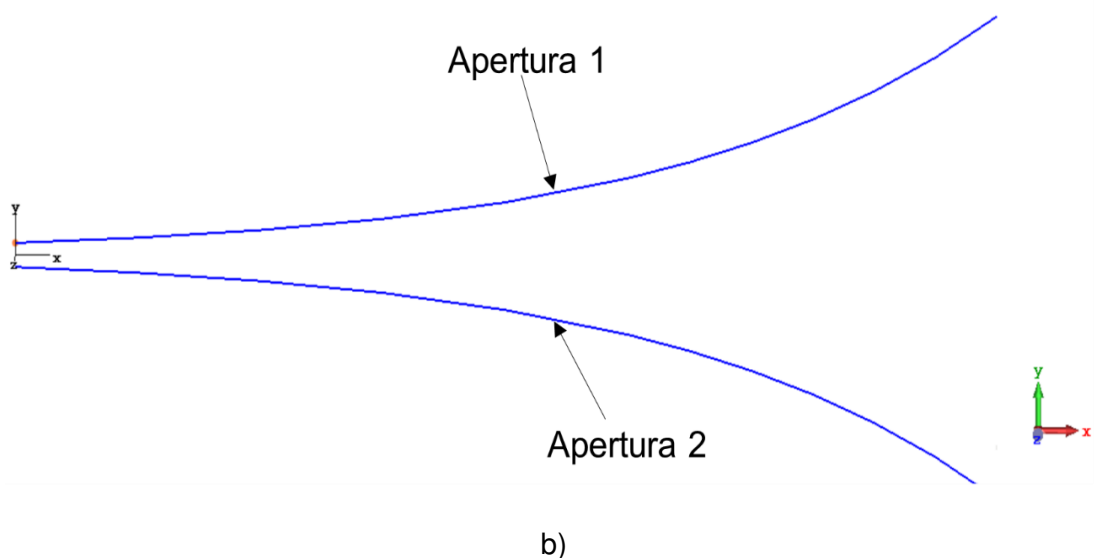
**Figura 2.19** Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

a) Vista Frontal. b) Vista Posterior.

La antena está compuesta por una capa de sustrato cuyas dimensiones horizontales dependen de las dimensiones tanto de la estructura de alimentación como de la estructura radiante. En la cara inferior del sustrato se coloca la línea *microstrip* con su *stub* radial, mientras que en la cara superior descansa una lámina de cobre, en la cual se grabará la estructura de alimentación correspondiente a la *slotline* con su respectivo *stub* radial, así como también la sección de radiación.

Para el modelado de la antena se empieza con la definición de la curva de apertura, para ello se utiliza la opción “*Analytical Curve*”. En la herramienta, se ubica los parámetros que conforman a la curva analítica, así como la expresión que la define, en nuestro caso dicha expresión es la ecuación (2.4).

La Figura 2.20 detalla las curvas exponenciales que representan a la estructura de radiación de la antena Vivaldi.



**Figura 2.20** Curvas exponenciales. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip- slotline*.

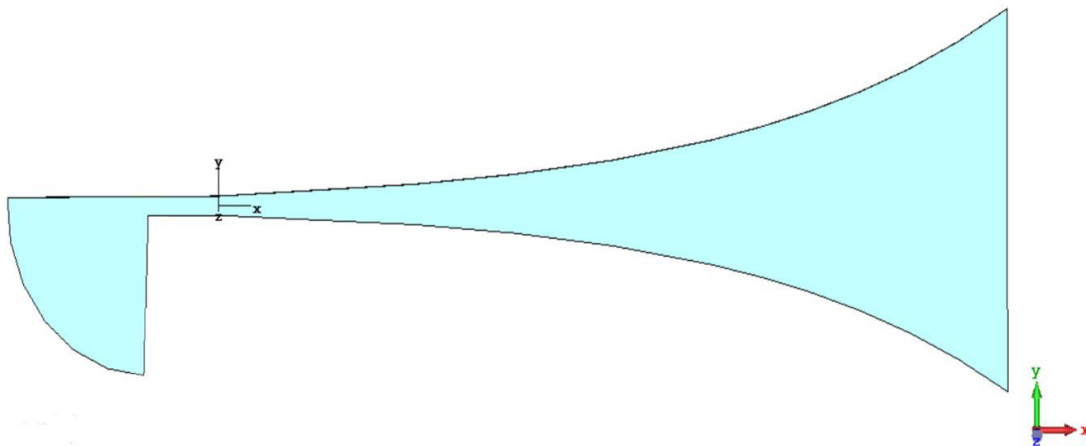
Existe una pequeña diferencia con respecto al diseño de alimentación, esta diferencia radica en la dimensión de la longitud del *slot* representada con el parámetro  $sL$  y se relaciona con  $QWS$  mediante la expresión dada en la ecuación (2.5).

$$sL = \frac{3}{2} \times QWS \quad (2.5)$$

Se escoge este valor de longitud del *slot* con el objetivo de disminuir las pérdidas en la transición entre las estructuras de alimentación y de radiación.

En la Figura 2.21 se presenta el perfil de la ranura para la antena Vivaldi con transición *microstrip-slotline*.

El estudio de la presente sección se realiza mediante simulaciones de la estructura radiante con diferentes valores en las coordenadas del segundo punto. Estos valores deben seguir un criterio que se expondrá más adelante.



**Figura 2.21** Perfil de la ranura para la Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

Una vez que los puntos hayan sido determinados, se encuentra el valor de la tasa de apertura de la curva,  $p$ , por medio de la ecuación (2.6).

$$p = \frac{1}{t} \times \ln \left( \frac{y}{A} \right) \quad (2.6)$$

A la última ecuación se la realiza cambios en sus variables para obtener una mejor correlación con los parámetros involucrados en este trabajo, obteniendo así la ecuación (2.7).

$$p = \frac{1}{TL} \times \ln \left( \frac{Y_{\max}}{A} \right) \quad (2.7)$$

Con el valor de la tasa de apertura, se definen las curvas exponenciales en la herramienta de simulación. Es así que, este estudio tendrá diferentes tasas de apertura en función a los diferentes valores que se asigne a las coordenadas del segundo punto.

Como valores de partida para el estudio de la estructura radiante, se utilizará los siguientes criterios [8]:

- La longitud de la curva ( $TL$ ) tiene que ser mayor a  $\lambda_o$
- La anchura final de la curva ( $TW$ ) tiene que ser mayor a  $\lambda_o/2$ .

El primer estudio de la estructura radiante se enfoca en la realización de simulaciones en donde se variará la longitud de la apertura manteniendo la coordenada  $Y_{\max}$  constante en un valor que cumpla el criterio mencionado. Los criterios de la anchura final de la apertura de la antena y del parámetro  $Y_{\max}$  se observan en la ecuación (2.8) y ecuación (2.9) respectivamente.

$$TW > \frac{\lambda_o}{2} \quad (2.8)$$

$$Y_{\max} = \frac{TW}{2} \quad (2.9)$$

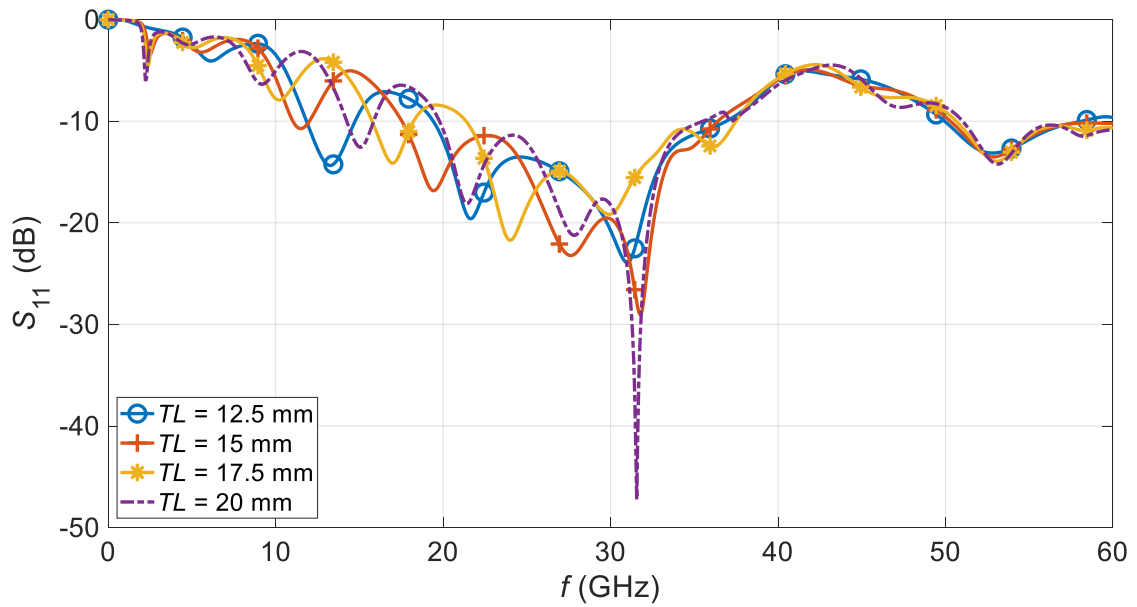
Por ende, el valor constante inicial que tomará este parámetro será  $Y_{\max} = 2,75$  mm

Con el valor de  $Y_{\max}$  fijo, se procede a variar la longitud de la apertura. Para ello el valor del parámetro  $TL$  se lo definirá en función de un cuarto de longitud de onda en el vacío, y por medio de la variación de un factor representado por el parámetro  $factorTL$  crecerá el valor de la longitud de la apertura. La expresión dada en la ecuación (2.10) relaciona las variables descritas.

$$TL = \frac{\lambda_o}{4} \times factorTL \quad (2.10)$$

Con el fin de cumplir con el criterio mencionado para esta dimensión, el parámetro  $factorTL$  tomará valores enteros a partir de cinco. Las gráficas que se observan en la Figura 2.22 indican el parámetro  $S_{11}$  que se obtiene cuando la estructura radiante presenta un cierto valor en su longitud.

En la Tabla 2.5 y en la Tabla 2.6 se detallan las características tanto circuitales como radiantes obtenidas en este estudio, con el fin de realizar una comparación y escoger el mejor valor para el parámetro de interés.



**Figura 2.22.** Variación de la longitud de la estructura radiante de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Parámetro  $S_{11}$ .

**Tabla 2.5** Características circuitales. Variación de la longitud de la apertura. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

$TL$ (mm)	Frecuencia (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
12,5	30,96	-23,9	19,41	36,91	17,5	62,14
15	31,80	-29,02	17,53	36,41	18,87	69,97
17,5	29,88	-19,16	21,37	37,49	16,12	54,77
20	31,56	-47,23	19,78	35,52	15,74	56,92

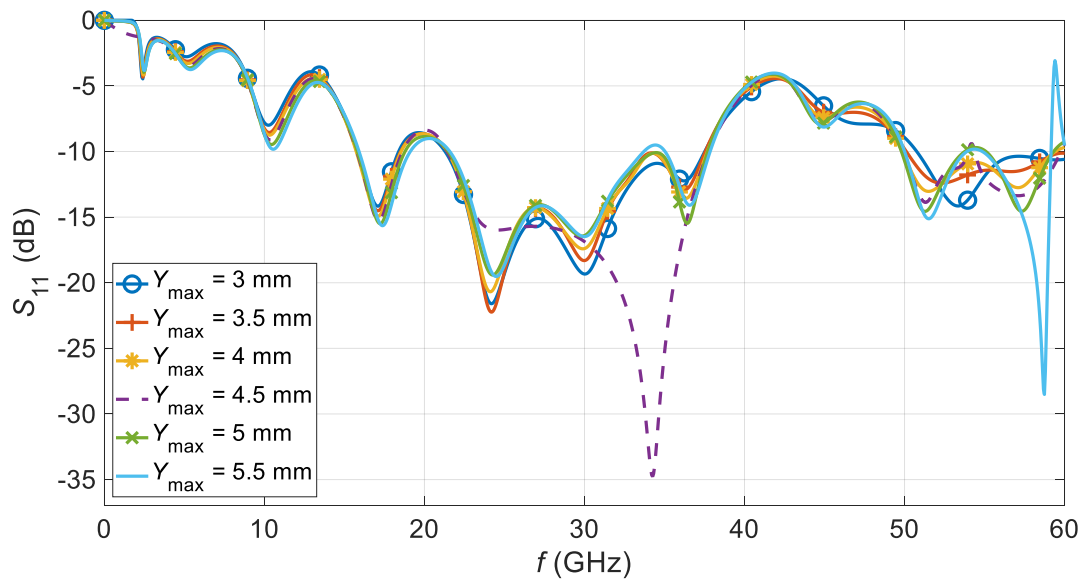
**Tabla 2.6** Características radiantes. Variación de la longitud de la apertura. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b>TL (mm)</b>	<b>Directividad (dBi)</b>	<b>Ganancia (dBi)</b>	<b>Eficiencia de radiación (%)</b>
12,5	6,84	6,73	97,53
15	6,94	6,83	97,47
17,5	7,13	7,00	97,24
20	6,89	6,77	97,18

Al analizar Figura 2.22 y la información detallada en la Tabla 2.5, se observa que la antena Vivaldi tiene una resonancia cuyo *notch* posee el punto mínimo cercano a 30 GHz cuando el largo de la apertura es 17,5 mm. Además, al comparar las características radiantes de cada valor de la apertura de la antena, también, el valor de 17,5 mm es el que presenta las mejores características.

Una vez seleccionada en primera instancia la dimensión para este parámetro se procede a ajustar su valor para tener el punto mínimo de su *notch* a la frecuencia de interés. Dicho valor es de 17,375 mm, ya que al analizar nuevamente la Figura 2.22, si se quiere obtener la resonancia a 30 GHz, es necesario disminuir el valor de la longitud de la apertura.

Con el valor de la longitud de la apertura determinado, se realiza el siguiente estudio, el cual consiste en realizar simulaciones en donde se varía el parámetro  $Y_{\max}$  manteniendo fijo el valor del parámetro  $TL$  encontrado. El parámetro  $Y_{\max}$  variará desde el valor inicial que se le asignó hasta el valor de  $L_m$ , valor que delimita a la antena. Las gráficas que se observan en la Figura 2.23 indican el parámetro  $S_{11}$  que se obtiene cuando la estructura radiante presenta un cierto valor en su parámetro  $Y_{\max}$ .



**Figura 2.23.** Variación del parámetro que define la mitad del ancho final de la apertura con el valor de la longitud de la apertura igual a 17,375 mm de la Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Parámetro  $S_{11}$ .

De igual manera, se detalla en la Tabla 2.7 y Tabla 2.8 las características tanto radiantes y circuitales del estudio de este parámetro, con el fin de elegir el valor con el cual se logre alcanzar los objetivos planteados para esta estructura.

**Tabla 2.7** Características circuitales. Variación del parámetro que define la mitad del ancho final de la apertura. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

$Y_{max}$ (mm)	Frecuencia (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
2,75	30	-19,34	21,29	37,52	16,23	55,19
3,5	30	-18,31	21,42	37,55	16,13	54,70
4	29,88	-17,42	21,44	37,68	16,24	54,94
4,5	34,26	-34,77	21,43	37,74	16,31	55,13
5	29,82	-16,45	21,49	37,7	16,21	54,77
5,5	30,01	-16,48	21,59	33,71	12,12	43,83

**Tabla 2.8** Características radiantes. Variación del parámetro que define la mitad del ancho final de la apertura. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

$Y_{\max}$ (mm)	Directividad (dBi)	Ganancia (dBi)	Eficiencia de radiación (%)
2,75	7,04	6,93	97,31
3,5	7,44	7,32	97,31
4	7,62	7,5	97,26
4,5	7,74	7,62	97,25
5	7,82	7,71	97,34
5,5	7,78	7,66	97,32

Por medio de este procedimiento se logra determinar los valores adecuados para los parámetros que conforman las coordenadas del segundo punto que define la estructura de radiación, y con ellos lograr los objetivos de interés en esta antena. En la Tabla 2.9 se detalla un resumen de todos los parámetros involucrados en la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con sus respectivos valores.

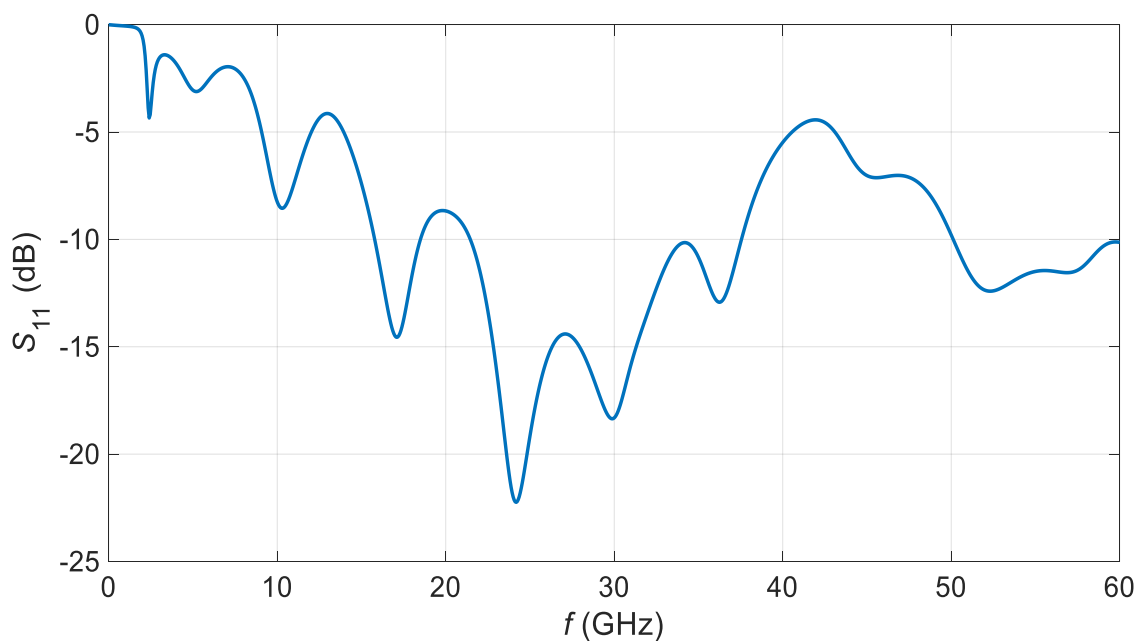
**Tabla 2.9** Dimensiones de la Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip- slotline*.

Parámetro	Descripción	Valor
$W_{\text{sustrato}}$	Ancho del sustrato	11,06 mm
$ext$	Extensión de la antena	1 mm
$h$	Espesor del sustrato	0,254 mm
$t$	Espesor de la capa de metal	0,0017 mm
$L_m$	Longitud de la línea <i>microstrip</i>	5,53 mm
$W_m$	Ancho de la línea <i>microstrip</i>	0,7126 mm
$QWM$	Radio del <i>stub</i> de la <i>microstrip</i>	2,57 mm
$theta$	Ángulo del <i>stub</i> radial	91°

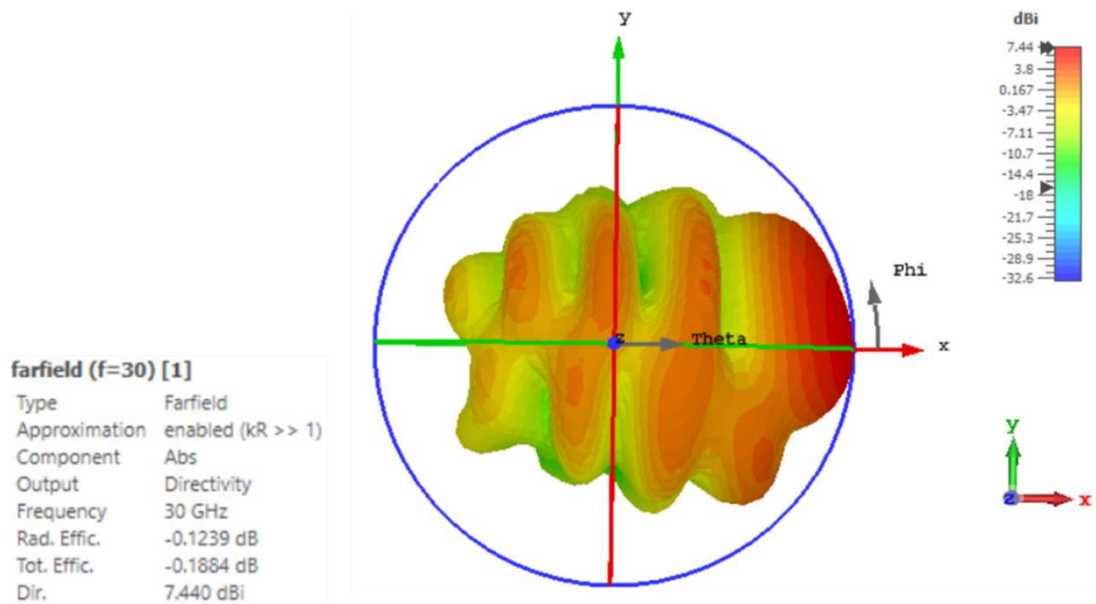


Parámetro	Descripción	Valor
$sL$	Longitud de la <i>slotline</i>	4,65 mm
$W_s$	Ancho de la <i>slotline</i>	0,35 mm
$QWS$	Radio del <i>stub de la slotline</i>	3,1 mm
$A$	Mitad del ancho del <i>slotline</i>	0,175 mm
$TL$	Longitud de la apertura	17,375 mm
$Y_{\max}$	Mitad del ancho de la apertura final	3,5 mm
$TW$	Ancho de la apertura	7 mm
$\rho$	Tasa de apertura de la estructura de apertura	0,172416

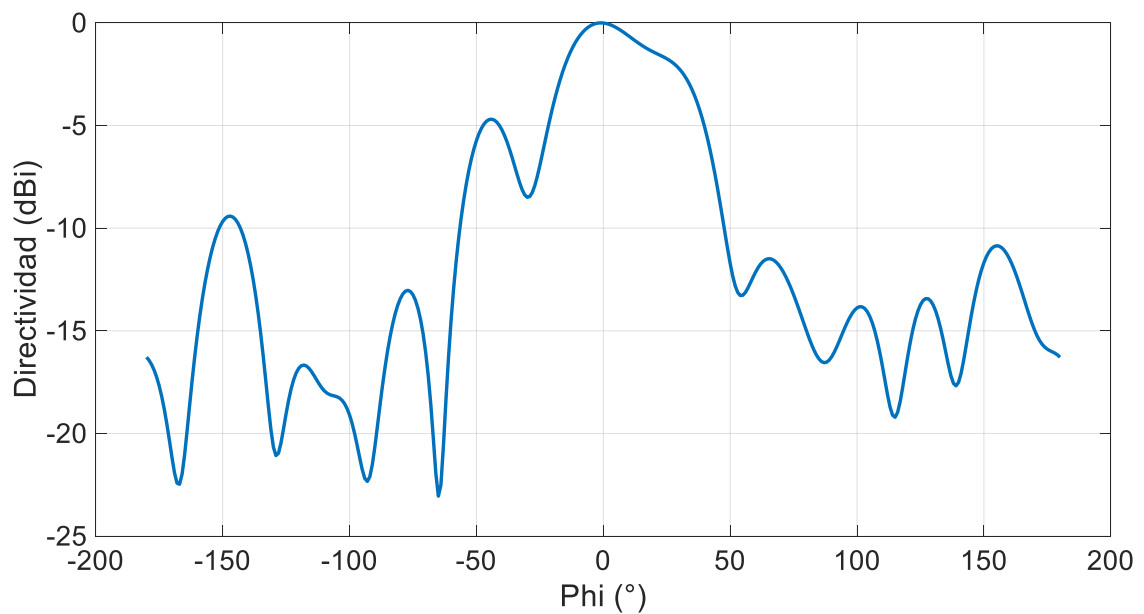
Con los valores de las dimensiones indicados en la Tabla 2.9, la Figura 2.24 y la Figura 2.25 muestran el comportamiento circuital y radiante de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* diseñada; es importante mencionar que para la vista cartesiana normalizada, el corte es para  $\theta = 90^\circ$ .



**Figura 2.24.** Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales. Parámetro  $S_{11}$ .



a)



b)

**Figura 2.25.** Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Patrón de radiación a) Directividad vista tridimensional. b) Directividad vista cartesiana normalizada.

Corte  $\theta = 90^\circ$ .

A la antena Vivaldi diseñada se le realizará estudios que involucren cambios en su perfil de apertura y aplicación de corrugaciones.

### 2.2.3 ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA

La idea de este estudio es formar una familia de curvas exponenciales entre los puntos que definen a la estructura de apertura de la antena Vivaldi presentada en la sección anterior. Además, crear una estructura de apertura lineal entre las coordenadas ya definidas para incluir a este estudio una antena LTSA.

Lo que se busca en este modelo es observar las diferentes características en términos circuitales y radiantes de la antena al variar su perfil de apertura.

Para lograr el grupo de curvas exponenciales se debe modificar la ecuación (2.4) agregándole una nueva variable, la cual, por medio de su valor definirá las diferentes curvas. La expresión que define a la familia de curvas exponenciales se observa en la ecuación (2.11).

$$y(t) = \pm A \times e^{p \times t^n} \quad (2.11)$$

La nueva variable  $n$  tomará valores enteros entre 1 (valor para una ecuación exponencial clásica) y 5.

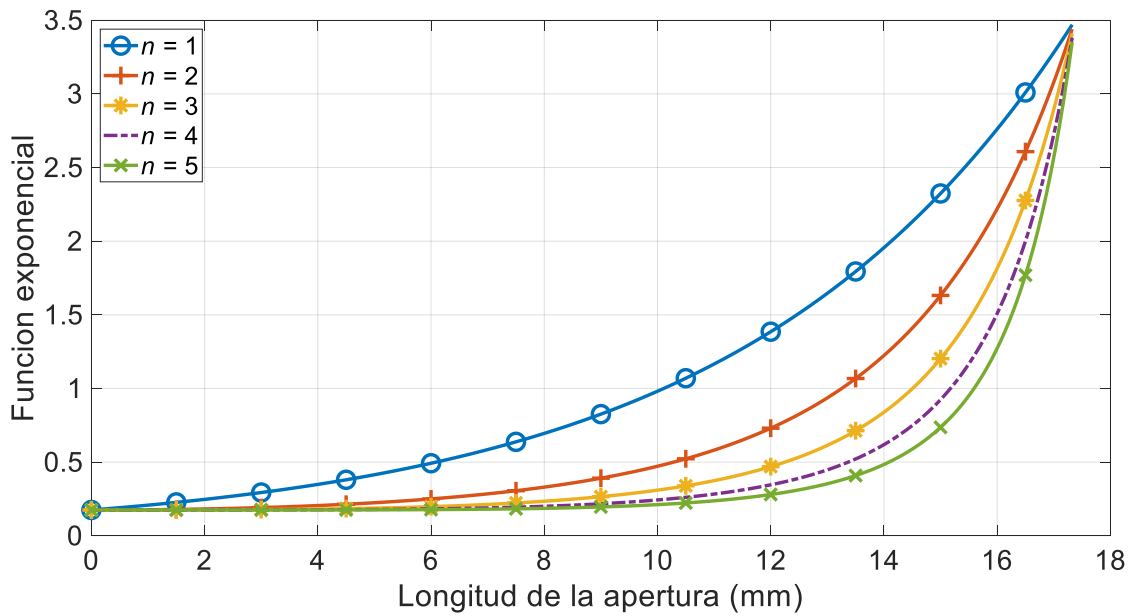
Al despejar la tasa de apertura  $p$  y al colocar la ecuación (2.11) en términos de los parámetros con los cuales se realiza el estudio se obtiene la expresión dada en la ecuación (2.12)

$$p = \frac{1}{TL^n} \times \ln \left( \frac{Y_{\max}}{A} \right) \quad (2.12)$$

Por medio de la ecuación (2.12), la Figura 2.26 indica la familia de curvas exponenciales con las que se realizará el estudio.

Para la estructura de apertura de la antena LTSA se utiliza la ecuación de la recta, la cual creará una línea que une los puntos que determinan a la sección radiante. En primer lugar, se define la pendiente de la recta por medio de la ecuación (2.13)

$$m = \frac{Y_{\max} - A}{TL} \quad (2.13)$$

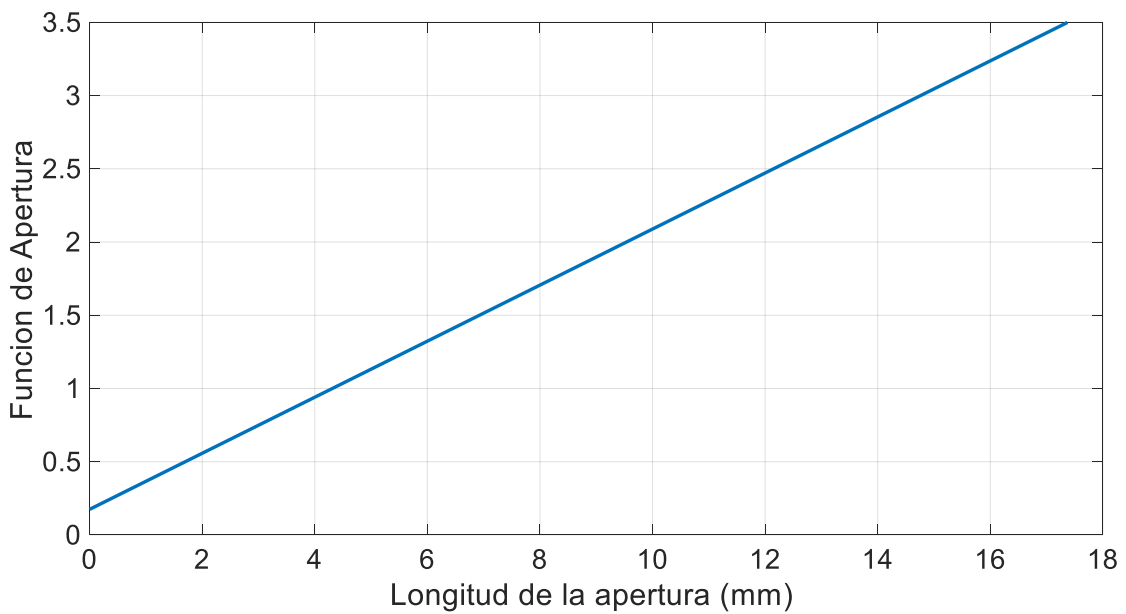


**Figura 2.26** Familia de curvas exponenciales para la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

Por medio de la pendiente se define la recta que caracteriza la apertura de la antena LTSA. La ecuación de la recta se observa en la ecuación (2.14)

$$y(t) = \pm(m \times t + A) \tag{2.14}$$

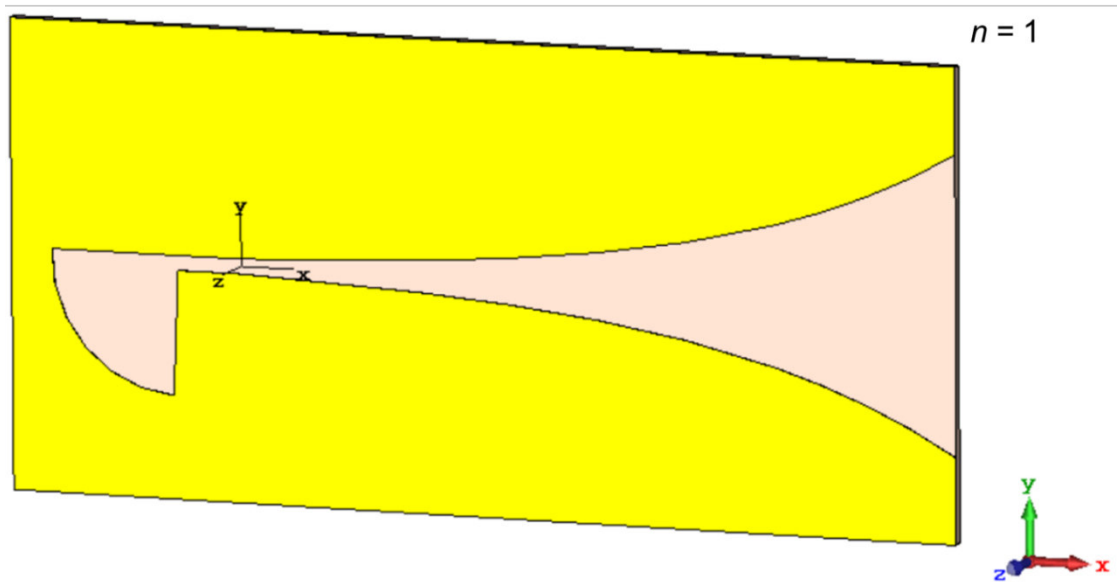
La Figura 2.27 indica el perfil de la recta que conformará la antena LTSA.



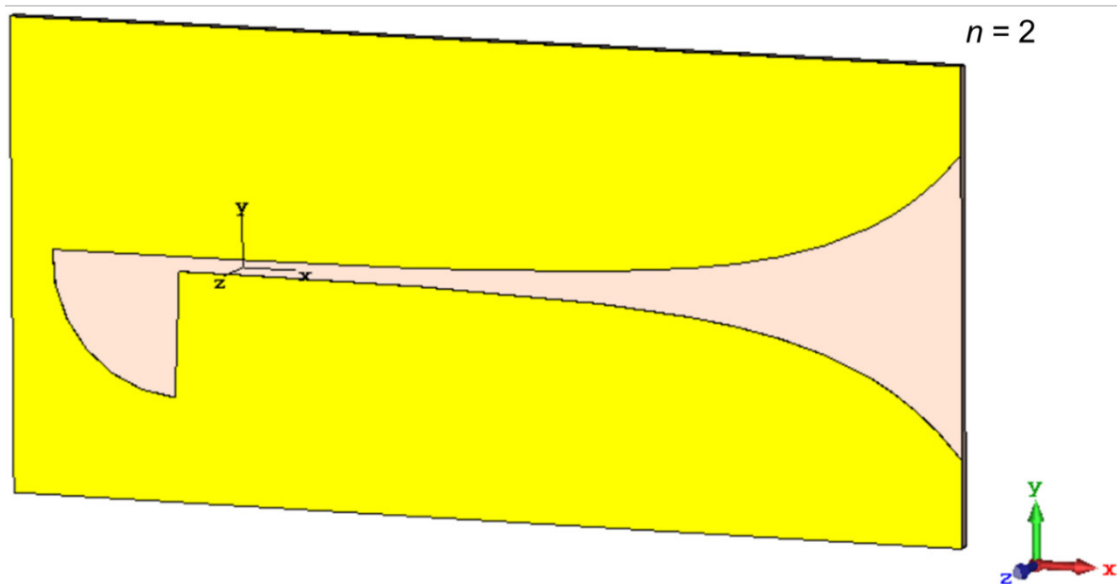
**Figura 2.27** Perfil de apertura lineal para la antena LTSA.

El proceso de modelado para las diferentes antenas con sus respectivas aperturas exponenciales es similar al ya presentado en la sección 2.2.2.

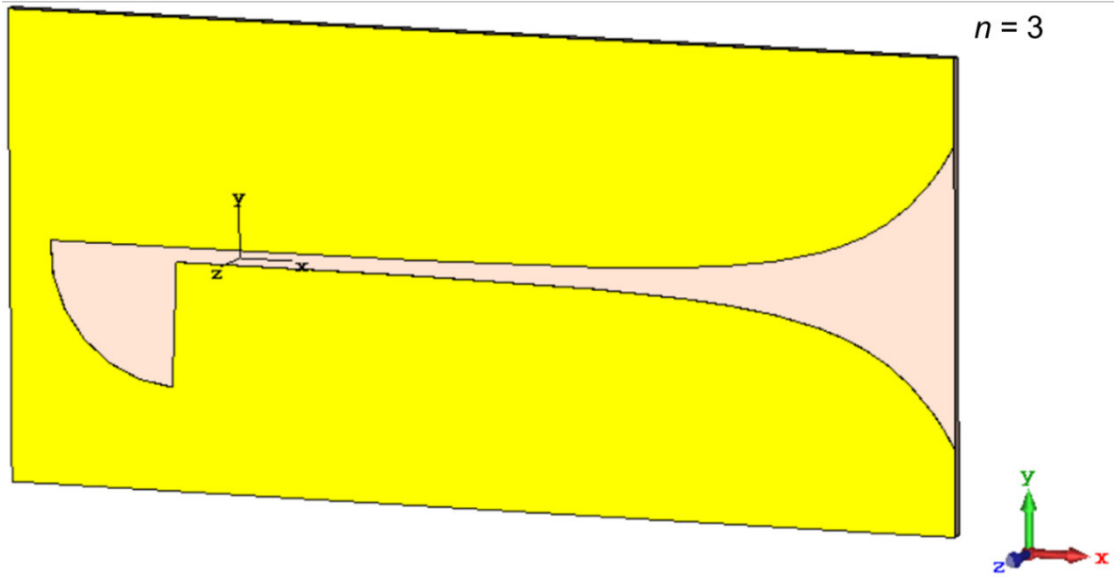
La Figura 2.28 presenta las diferentes antenas Vivaldi diferenciadas por su estructura de apertura exponencial, así como también la antena LTSA.



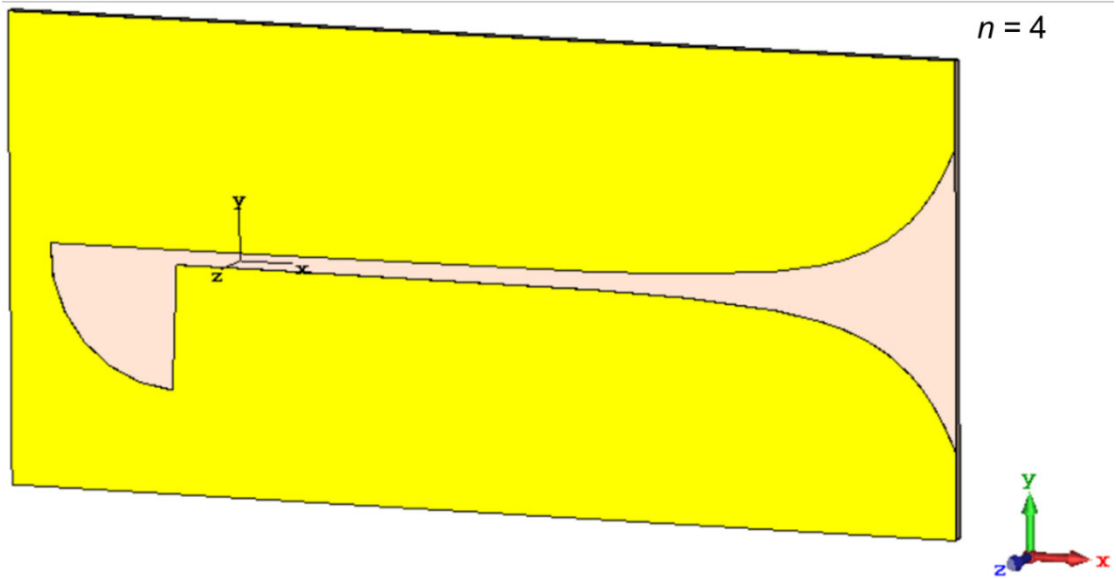
a)



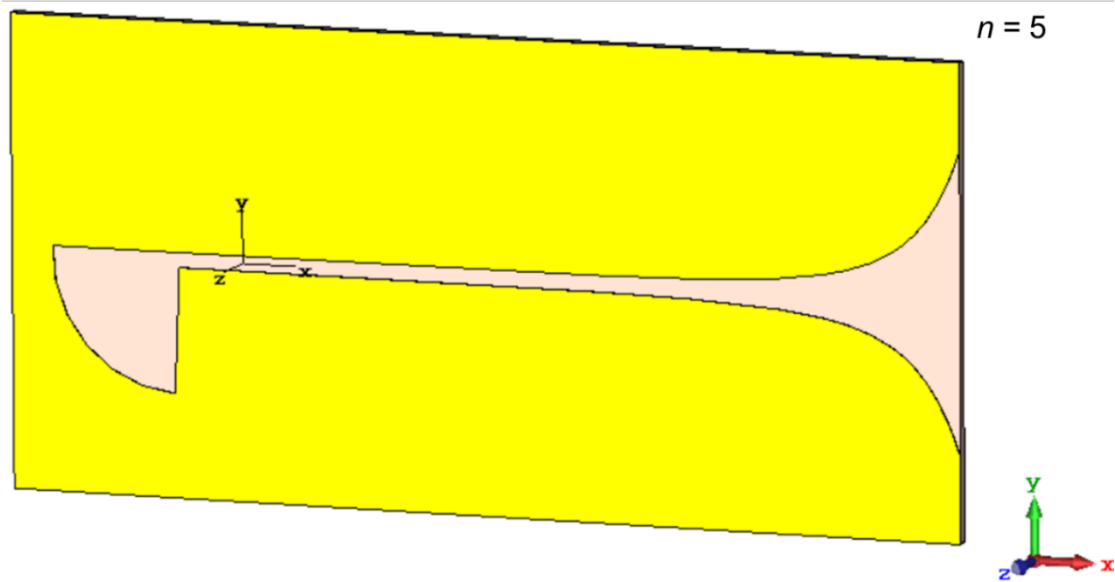
b)



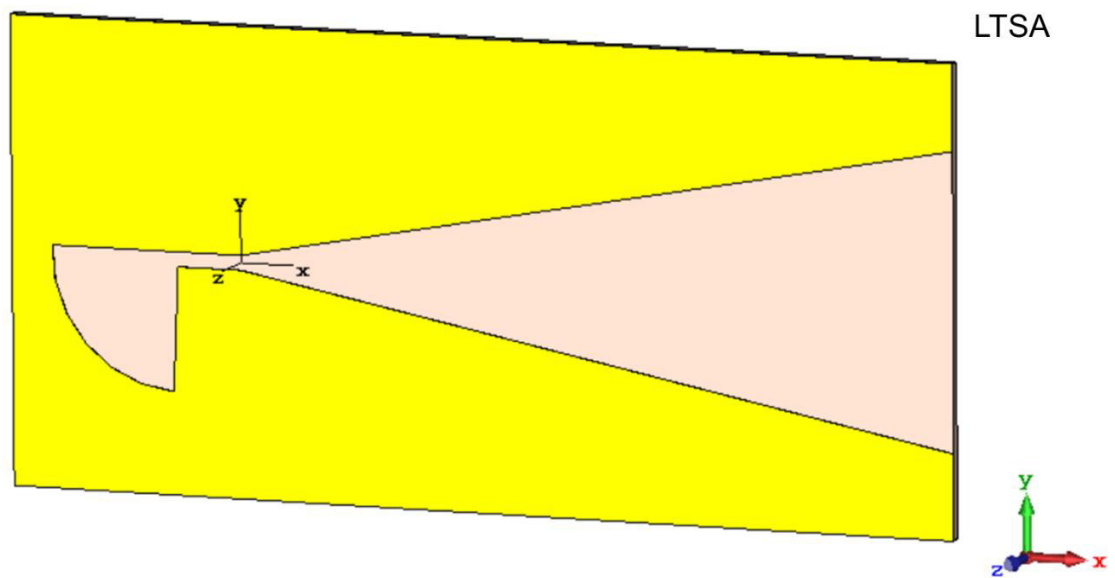
c)



d)



e)



f)

**Figura 2.28** Antenas Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con diferentes perfiles en su estructura de apertura. Exponencial a)  $n = 1$ . b)  $n = 2$ . c)  $n = 3$ . d)  $n = 4$ . e)  $n = 5$ . Lineal f) LTSA.

## 2.2.4 ESTUDIO DE CORRUGACIONES

El presente proyecto de titulación contempla la realización del proceso de miniaturización a las antenas Vivaldi. Dentro de las diversas técnicas que existen se encuentra el uso de corrugaciones. A continuación, se realizará un estudio de corrugaciones rectangulares que se aplicarán a la estructura de apertura tanto en su parte externa como interna.

### *Corrugaciones Externas*

El objetivo de aplicar esta técnica es mejorar las características radiantes de la Vivaldi original, al mismo tiempo se procura mantener al elemento radiante categorizado como antena de banda ancha. Entre las características de radiación que se buscan mejorar están:

- Directividad
- Ganancia
- Relación frente-atrás
- Anchura angular

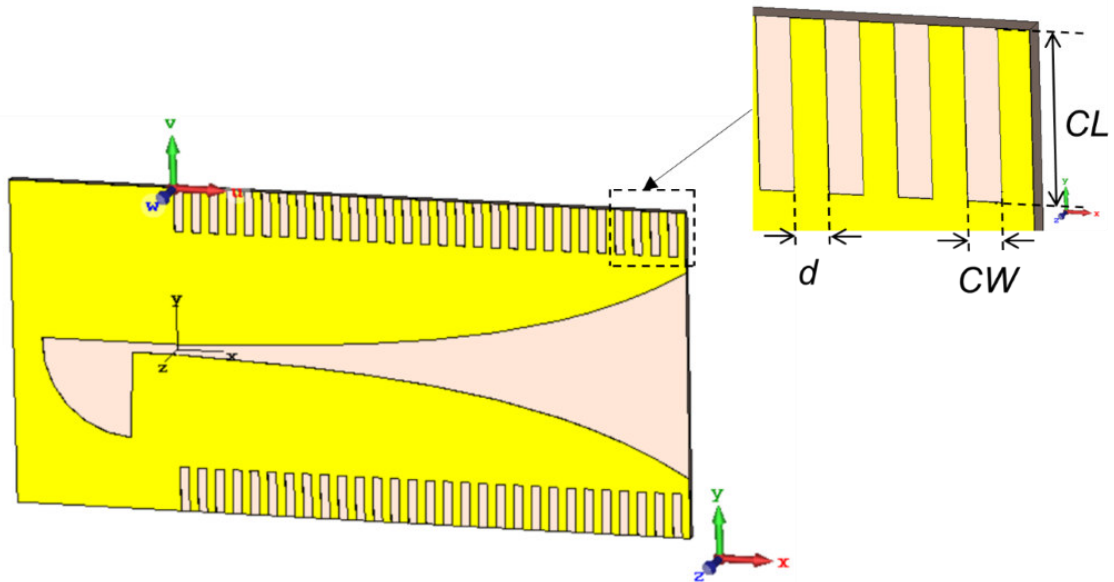
En la característica de relación-frente atrás se busca lograr que la antena con corrugaciones externas presente un valor cercano a 20 dB.

Otras características tales como apuntamiento o eficiencia de radiación lo que se busca es que en lo posible se mantengan en su valor original o en el peor de los casos varíen muy poco de forma negativa con respecto a los valores que la antena Vivaldi de referencia posee.

La Figura 2.29 muestra el modelo de la antena Vivaldi con corrugaciones.

La estructura modelada consiste en la antena Vivaldi con su apertura exponencial clásica, a la cual, en la parte externa de su sección radiante se colocarán corrugaciones rectangulares. Las corrugaciones consistirán en sólidos rectangulares de dimensiones  $CW \times CL \times t$  separadas entre sí una distancia  $d$ ; se componen de material vacío para su posterior grabado en todo el largo de la apertura.





**Figura 2.29** Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con corrugaciones externas en su estructura de apertura.

Para los valores que corresponden a las dimensiones de estas ranuras se basará en los siguientes criterios [29]:

- El ancho de las corrugaciones ( $CW$ ) y la separación entre ellas ( $d$ ) debe ser menor a  $\lambda_{o\_max} / 2$  calculada a la frecuencia más alta de operación.
- La longitud de las corrugaciones ( $CL$ ) debe ser un valor que se encuentre entre  $\lambda_{o\_min} / 4$  calculada a la frecuencia más baja de operación y  $\lambda_{o\_out} / 2$  de la frecuencia fuera del ancho de banda superior.

Para aplicar dichos criterios se necesita de las características circuitales de la antena. La antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* opera dentro de un ancho de banda cuyos límites son los siguientes:  $f_{min} = 21,42$  GHz,  $f_{max} = 37,55$  GHz.

Para la frecuencia superior fuera del ancho de banda de operación se escoge la frecuencia de 200 GHz.

Mediante los criterios expuestos, se calcula las restricciones para encontrar las dimensiones que conforman a las corrugaciones. Dichas restricciones se las obtienen mediante la ecuación (2.15), ecuación (2.16) y la ecuación (2.17).

$$\frac{\lambda_{o\_max}}{2} = \frac{c_0}{2 \times f_{max}} \quad (2.15)$$

$$\frac{\lambda_{o\_min}}{4} = \frac{c_o}{4 \times f_{min}} \quad (2.16)$$

$$\frac{\lambda_{o\_out}}{2} = \frac{c_o}{2 \times f_{out}} \quad (2.17)$$

Por ende, las dimensiones del ancho como la separación de cada una de las corrugaciones tomarán los valores correspondientes a:  $CW < 3,99$  mm,  $d < 3,99$  mm.

Mientras que para el largo de las corrugaciones se tiene:  $3,5$  mm  $< CL < 0,75$  mm.

Estos criterios son un buen punto de partida para el estudio presente, pero poseen un amplio abanico de posibilidades. Es por ello que se opta por criterios más restringidos y que se adapten a la frecuencia de diseño. Estos nuevos criterios que se observan en la ecuación (2.18), ecuación (2.19) y ecuación (2.20) son expuestos en [7].

$$CW \approx 0,2 \text{ mm} \quad (2.18)$$

$$d \approx 0,2 \text{ mm} \quad (2.19)$$

$$CL > 2,5 \text{ mm} \quad (2.20)$$

Como se puede observar, las nuevas restricciones cumplen con los criterios expuestos en un principio.

Para el presente estudio se considera que los parámetros que representa al ancho y a la separación de las corrugaciones, tendrán la misma magnitud.

El número de corrugaciones a lo largo de la estructura variarán en función al ancho de cada una de ellas, así como también a la separación existente entre ellas. La expresión que relaciona el número de corrugaciones con las variables mencionadas es la dada en la ecuación (2.21)

$$num\_Corrugaciones = \frac{TL}{2 \times CW} \quad (2.21)$$

La metodología utilizada para esta sección es la siguiente.

En primer lugar, se fija el valor del ancho de la corrugación en 0,2 mm y se realiza el primer análisis, el cual consiste en variar la longitud de cada corrugación entre 0,5 mm y 2 mm. A continuación, se presenta en la Tabla 2.10 las características de radiación que posee la antena según las dimensiones de las corrugaciones implementadas.

**Tabla 2.10** Estudio del largo de la corrugación de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b>CW</b> (mm)	<b>CL</b> (mm)	<b>Directi- vidad</b> (dBi)	<b>Relación frente- atrás</b> (dB)	<b>Eficien- cia de radiación</b> (%)	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angular</b> (°)	<b>Nivel de lóbulo lateral</b> (dB)
0,2	0,5	9,35	13,36	96,95	-3	34,1	-9
0,2	1	10,79	18,24	97,35	-4	33,8	-15,6
0,2	1,5	9,81	20,18	96,95	-3	41,1	-14,7
0,2	2	9,37	20,52	97,25	-2	45,6	-15,6

Al analizar la Tabla 2.10, se observa que en primer lugar al utilizar el valor de 0,5 mm para el parámetro *CL* la antena presenta mejoras en términos radiantes, pero los niveles de las mejoras no son tan buenos como los que se tiene con los otros valores para este parámetro. Es por ello que para los estudios posteriores no se tomará en cuenta este valor. Adicionalmente, se observa que con ciertos valores de *CL* se tiene buenos niveles de mejoramiento para cierta característica de radiación, pero para otra característica no tanto.

Debido a este comportamiento, para el siguiente estudio se realizará simulaciones en las cuales se combina los valores de los parámetros que definen a las corrugaciones, es decir se fijará en un valor la longitud de la corrugación (1 mm; 1,5 mm; 2 mm) y para cada valor de este parámetro se realizará simulaciones en donde se varía el ancho de la corrugación desde un valor de 0,3 mm hasta 0,5 mm.

Dicho estudio se presenta en la Tabla 2.11, Tabla 2.12 y Tabla 2.13.

**Tabla 2.11** Variación del ancho de la corrugación con  $CL = 1$  mm. de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Rela- ción frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
0,3	1	10,84	17,71	97,45	-3	33,7	-15,6
0,4	1	10,85	17,00	97,33	-3	33,5	-15,7
0,5	1	10,88	15,85	97,24	-2	33,1	-15,3

**Tabla 2.12** Variación del ancho de la corrugación con  $CL=1,5$  mm de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Rela- ción frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
0,3	1,5	9,85	20,63	97,02	-3	40,8	-15,4
0,4	1,5	9,85	20,20	97,04	-3	40,7	-15,7
0,5	1,5	9,88	20,01	96,69	-3	40,5	-15,3

**Tabla 2.13** Variación del ancho de la corrugación con  $CL=2$  mm de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b><i>CW</i></b> (mm)	<b><i>CL</i></b> (mm)	<b>Directi- vidad</b> (dBi)	<b>Relación frente- atrás</b> (dB)	<b>Eficien- cia de radiación</b> (%)	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral</b> (dB)
0,3	2	9,37	20,52	97,25	-2	45,6	-15,6
0,4	2	9,32	20,65	97,35	-2	45,8	-15,7
0,5	2	9,30	20,21	97,38	-2	46,1	-15,41

Mediante esta metodología se logró determinar dos diferentes pares de valores para las dimensiones de las corrugaciones. Cada par de dimensiones mejora en mayor medida a una de las características radiantes principales que se propuso en el estudio. Los diferentes valores son detallados en la Tabla 2.14.

**Tabla 2.14** Dimensiones de corrugaciones externas de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor 1 (mm)</b>	<b>Valor 2 (mm)</b>
<i>CL</i>	Altura de la corrugación	1	1.5
<i>CW</i>	Ancho de la corrugación	0.3	0.3
<i>d</i>	Separación entre corrugaciones	0.3	0.3

Para el estudio realizado, en todos los casos se cumple que el elemento es una antena de banda ancha.

### *Corrugaciones Internas*

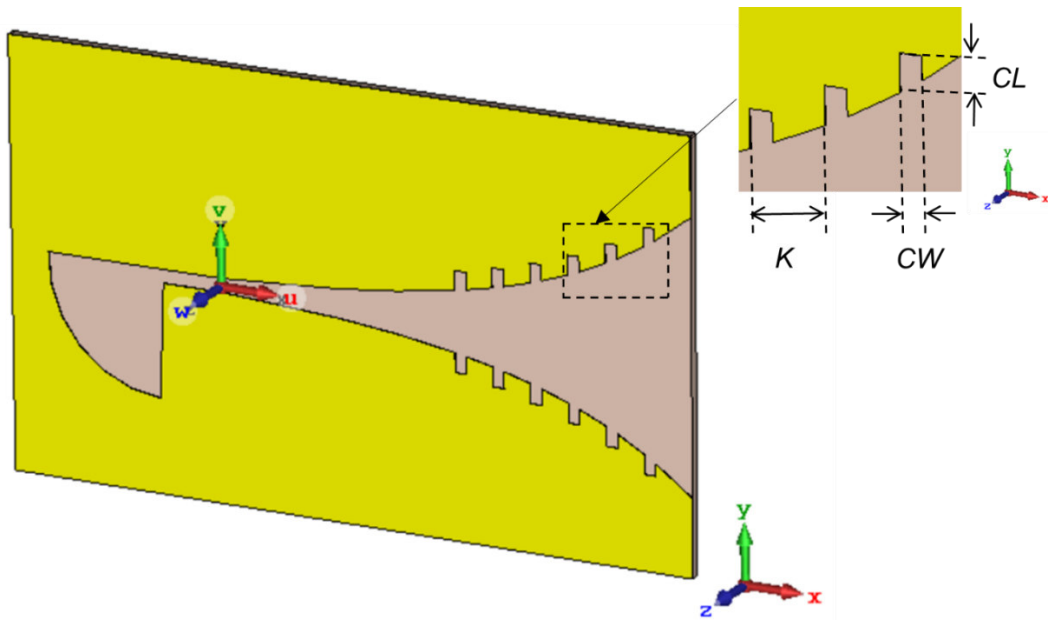
A continuación, se realizará el diseño de corrugaciones que se colocarán en el interior de la sección de apertura, con el objetivo de miniaturizar a la antena Vivaldi. La miniaturización es el proceso por el cual se logra una reducción en las dimensiones de la antena con la condición de conservar las características radiantes en los valores que posee la antena original.

El presente estudio consiste en encontrar las dimensiones óptimas de las corrugaciones (largo, ancho y separación) para lograr una miniaturización mayor al 20% en la dimensión del largo de la estructura de radiación. Para lograr el objetivo planteado de esta sección, las características radiantes de la antena miniaturizada deben presentar un valor con un margen de error máximo del 5% con respecto a los valores de las características radiantes de la Vivaldi original; otro punto a considerar es la obtención de una antena miniaturizada con un ancho de banda absoluto y relativo que permita definir a la antena como elemento de banda ancha, es decir que el ancho de banda absoluto sea mayor a 500 MHz y que el ancho de banda relativo sea mayor al 20% .

En este diseño resulta más complicado la colocación de las diferentes corrugaciones, ya que estas se posicionarán a lo largo de la parte interna de la apertura, lo que significa que deben seguir el perfil exponencial.

Es importante mencionar que las corrugaciones no se ubicarán en todo el largo de la estructura de apertura ya que la carga de simulación de este programa resulta muy pesada para su procesamiento en la computadora, es por ello, que se decide ubicar corrugaciones a partir de la mitad de la curva de apertura. Además, el número de corrugaciones a lo largo del eje X se encuentra en función de la periodicidad y del ancho de cada corrugación. Se procura que las corrugaciones lleguen hasta un punto máximo del eje X en el cual la estructura pueda definirse con las dimensiones que se le han establecido.

El modelado de esta estructura empieza con la antena Vivaldi miniaturizada en la dimensión del largo de la apertura. A dicha antena se aplicará corrugaciones cuyas dimensiones ayudarán a obtener características radiantes similares a la antena Vivaldi original. La antena miniaturizada modelada se presenta en la Figura 2.30.



**Figura 2.30** Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* miniaturizada.

El concepto de periodicidad representado por  $K$  es muy importante en este modelo ya que aparte de definir el posicionamiento de las estructuras, también facilita el análisis en los parámetros de ancho y separación de las corrugaciones gracias a la relación existente entre estas tres variables. Al establecer un valor fijo de periodicidad se puede realizar el análisis de anchura de la corrugación y de forma indirecta se realiza el estudio de la separación entre ella. Es por ello que en este modelo se enfocará en el parámetro de periodicidad y no en el de separación.

Las dimensiones de largo, ancho y de periodicidad se basarán en los mismos criterios expuestos en la sección previa.

La metodología para esta estructura empieza con la asignación de un valor para el largo de la apertura de la antena miniaturizada, el cual debe ser al menos un 20% menor al valor del largo de la apertura de la antena original, y a partir de ello se modifica las dimensiones de las corrugaciones.

En primer lugar, se establece que la reducción del largo de la parte radiante de la antena corresponde efectivamente al 20% de su valor original, es decir  $TL = 13,75$  mm.

Con este objetivo planteado se procede a colocar las corrugaciones con una periodicidad de 0,8 mm y se realiza diferentes simulaciones en donde se varía los parámetros del largo y ancho de la corrugación. El estudio mencionado se presenta en la Tabla 2.15.

**Tabla 2.15** Variación de las dimensiones de las corrugaciones de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

<b>CW</b> <b>(mm)</b>	<b>CL</b> <b>(mm)</b>	<b>Directi- vidad</b> <b>(dBi)</b>	<b>Relación</b> <b>frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de</b> <b>radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción</b> <b>lóbulo</b> <b>princi- pal (°)</b>	<b>An- chura</b> <b>angu- lar (°)</b>	<b>Nivel</b> <b>de</b> <b>lóbulo</b> <b>lateral</b> <b>(dB)</b>
0,2	0,5	7,6	11,06	97,02	2	49,1	-5,6
0,2	0,75	7,28	9,98	96,67	4	47,9	-4,9
0,2	1	6,41	7,91	96,31	6	46,4	-4
0,2	1,5	8,27	2,74	90,42	-18	32,3	-2,7

Al analizar la Tabla 2.15 se observa que las características de radiación se asemejan a las características que posee la antena sin miniaturizar cuando el valor del largo de la corrugación es 0,75 mm o de 0,5 mm, es por ello que se realiza una nueva variación del ancho de las corrugaciones para un valor del parámetro *CL* el cual se encuentre dentro de estas dos opciones.

Para el nuevo estudio se escoge un valor del parámetro *CL* correspondiente a 0,63 mm; dicho estudio se presenta en la Tabla 2.16

Al analizar la Tabla 2.16, se observa que, con el valor para el largo de la corrugación establecido, se logra un buen acercamiento para la mayoría de las características radiantes, pero una de las de mayor importancia para este estudio que es la relación frente- atrás aún está lejos de tener un valor cercano al valor de esta característica que presenta la antena Vivaldi original.



**Tabla 2.16** Variación de ancho de la corrugación de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Primer estudio.

<b>CW</b> <b>(mm)</b>	<b>CL</b> <b>(mm)</b>	<b>Directi- vidad</b> <b>(dBi)</b>	<b>Relación</b> <b>frente- atrás</b> <b>(dB)</b>	<b>Eficiencia</b> <b>de</b> <b>radiación</b> <b>(%)</b>	<b>Direc- ción</b> <b>lóbulo</b> <b>princi- pal (°)</b>	<b>An- chura</b> <b>angu- lar (°)</b>	<b>Nivel</b> <b>de</b> <b>lóbulo</b> <b>lateral</b> <b>(dB)</b>
0,1	0,63	7,52	10,78	96,86	2	49	-5,5
0,2	0,63	7,45	10,55	96,79	3	49	-5,3
0,3	0,63	7,46	10,55	96,87	3	48	-5,1
0,4	0,63	7,41	10,73	96,65	3	49,1	-5,3

Debido a las razones expuestas se realiza el mismo estudio, pero con periodicidad de 0,6 mm y 1 mm, las cuales se presenta en la Tabla 2.17 y Tabla 2.18 respectivamente.

**Tabla 2.17** Variación de ancho de la corrugación de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Primer estudio.

<b>CW</b> <b>(mm)</b>	<b>CL</b> <b>(mm)</b>	<b>Directi- vidad</b> <b>(dBi)</b>	<b>Relación</b> <b>frente- atrás</b> <b>(dB)</b>	<b>Eficien- cia de</b> <b>radiación</b> <b>(%)</b>	<b>Direc- ción</b> <b>lóbulo</b> <b>princi- pal (°)</b>	<b>An- chura</b> <b>angu- lar (°)</b>	<b>Nivel</b> <b>de</b> <b>lóbulo</b> <b>lateral</b> <b>(dB)</b>
0,1	0,63	7,31	10,43	96,47	3	50,2	-5,4
0,2	0,63	7,36	10,42	96,69	3	48,7	-5
0,3	0,63	7,36	10,45	96,78	4	47,8	-4,9
0,4	0,63	7,43	10,76	96,75	3	48,1	-5,1
0,5	0,63	7,48	11,05	96,67	3	48,4	-5,3

**Tabla 2.18** Variación de ancho de la corrugación de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Primer estudio.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Relación frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
0,1	0,63	7,58	11,04	96,87	2	49,2	-5,6
0,2	0,63	7,53	10,83	96,94	2	48,6	-5,4
0,3	0,63	7,50	10,88	96,81	3	48,4	-5,3
0,4	0,63	7,50	10,89	96,80	3	48,6	-5,4
0,5	0,63	7,49	10,92	96,65	3	48,6	-5,4

Con este estudio realizado no se logra obtener una antena miniaturizada que presente características radiantes semejante a la antena Vivaldi diseñada en la sección 2.2.2, en especial en su característica de relación frente-atrás. Es por ello que se decide cambiar la longitud de la antena. Esta vez la longitud de la apertura de antena corresponde al siguiente valor  $TL = 12,5$  mm. Con este nuevo valor miniaturizado, se realiza el mismo procedimiento que se lo detalló anteriormente. El contenido se presenta en la Tabla 2.19.

**Tabla 2.19** Variación de las dimensiones de la corrugación con  $K = 1$  mm de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Segundo estudio.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Relación frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
0,2	0,5	7,29	15,98	97,44	-1	51,3	-6,3
0,2	0,63	7,34	15,81	97,22	0	51,2	-6,4
0,2	0,75	7,32	15,51	96,79	0	52	-6,6

En la Tabla 2.19 se observa que, al utilizar el valor tanto de 0,5 mm como de 0,63 mm para el largo de la corrugación, se obtiene que el valor de la característica relación frente-atrás mejora, con ello se logra valores cercanos al que se presenta en la estructura original.

En la Tabla 2.20 y Tabla 2.21 se detalla el estudio del ancho de la corrugación con los valores del largo de la corrugación establecidos en 0,63 mm y 0,5 mm respectivamente.

**Tabla 2.20** Variación de ancho de la corrugación de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Segundo estudio.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Relación frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
0,1	0,63	7,28	15,97	97,25	0	51,4	-6,4
0,2	0,63	7,34	15,81	97,22	0	51,2	-6,4
0,3	0,63	7,37	15,77	97,13	0	50,8	-6,4

**Tabla 2.21** Variación de ancho de la corrugación de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*. Segundo estudio.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Relación frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
0,1	0,5	7,25	16,19	97,37	-1	51,3	-6,3
0,2	0,5	7,29	15,98	97,44	-1	51,3	-6,3
0,3	0,5	7,32	16,07	97,35	-1	51,2	-6,4

Por medio de la metodología explicada se logró establecer los valores adecuados para los parámetros que intervienen en el estudio presente, logrando con ellos los objetivos planteados para esta estructura. Los parámetros con sus respectivos valores son presentados en la Tabla 2.22

**Tabla 2.22** Dimensiones de corrugaciones internas para la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

Parámetro	Descripción	Valor (mm)
$CL$	Altura de la corrugación	0,5
$CW$	Ancho de la corrugación	0,3
$k$	Periodo de aparición de corrugaciones	1

## 2.3 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN ANTIPODAL

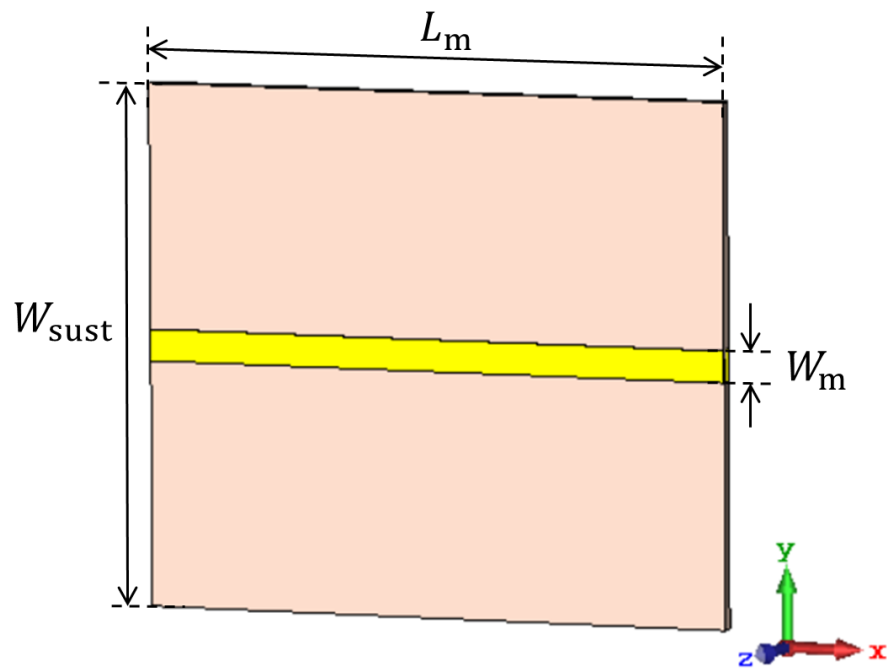
En esta sección se realizará el proceso de diseño, modelamiento y simulación de una antena Vivaldi con alimentación antipodal. La mayoría de los modelos que se expondrán a continuación, se basarán en los mismos criterios utilizados en el diseño de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*.

### 2.3.1 DISEÑO DE ALIMENTACIÓN

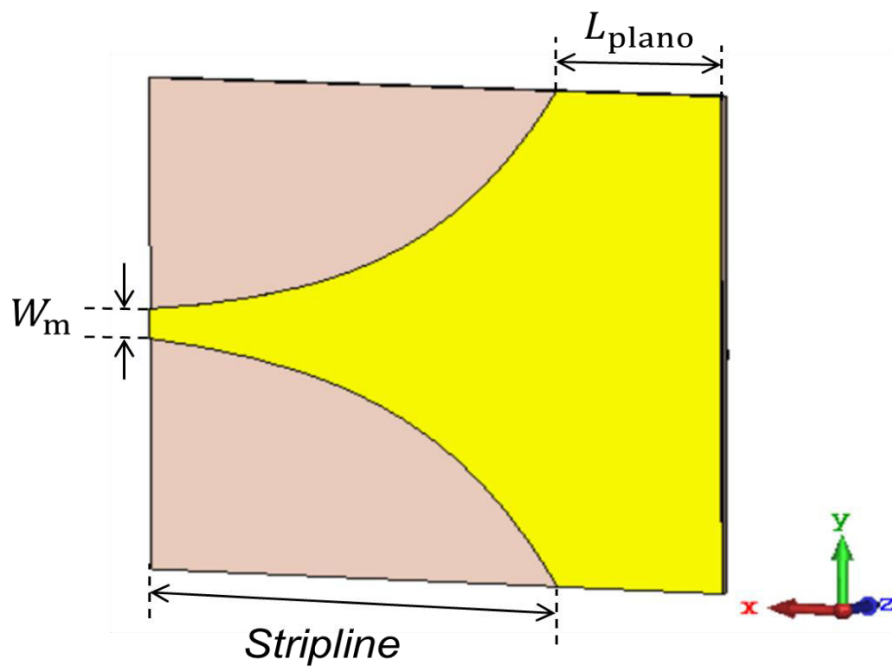
Como ya se lo explicó en el primer capítulo, la estructura de alimentación antipodal se compone de una línea *microstrip* cuyo plano de masa, que se encuentra en la cara opuesta del sustrato, gradualmente se estrecha hasta formar una línea de transmisión compuesta por un par de *striplines*.

El objetivo de este diseño será encontrar las dimensiones tanto de la línea *microstrip* como las del plano de masa para que la estructura de alimentación posee un buen acoplamiento, con el punto mínimo de resonancia en 30 GHz, además, que las pérdidas de retorno en la sección de transición con la estructura radiante sean mínimas.

La estructura de alimentación antipodal se presenta en la Figura 2.31.



a)



b)

**Figura 2.31** Estructura de alimentación antipodal. a) Vista Frontal. b) Vista Posterior.

La alimentación de la estructura se realiza por medio de dos puertos guía de onda con el fin de estudiar el acoplamiento de la estructura y las pérdidas que se producen en el punto de transición entre la línea de transmisión y la estructura radiante de la antena. Los puertos

se ubicarán en cada extremo de la línea *microstrip*.

Los valores de las dimensiones que conforman a la estructura modelada se obtienen de la siguiente manera.

En primer lugar, el valor del ancho tanto del sustrato como del plano de masa corresponde al ancho de la antena Vivaldi diseñada en la sección 2.2.

El ancho de línea *microstrip* será el valor optimizado para que la estructura tenga una impedancia de 50  $\Omega$ .

La constante dieléctrica efectiva tiene el valor aproximado de  $\epsilon_{re} = 1,846$ . Con el valor de este parámetro, se calcula la longitud de onda de la línea *microstrip* por medio de la ecuación (1.7). Al aplicar la ecuación, se obtiene que  $\lambda_m$  7,36 mm.

Con el valor de la longitud de onda se procede a calcular los siguientes valores.

En primer lugar, para el largo del plano de masa se utiliza el criterio dado en la expresión de la ecuación (2.22).

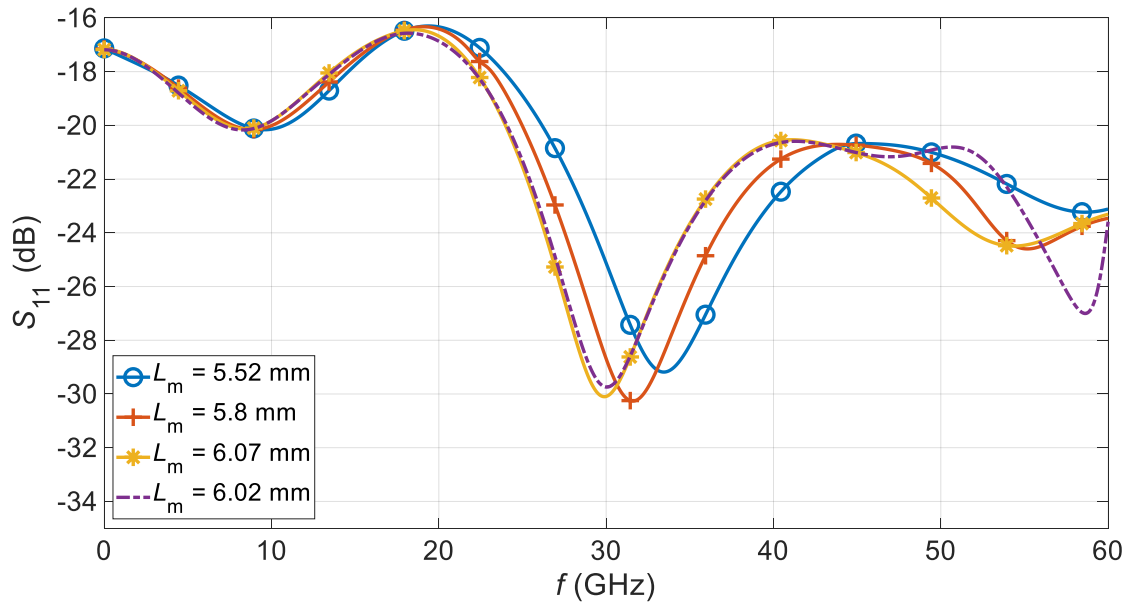
$$L_{\text{plano}} \approx \frac{\lambda_m}{2} \quad (2.22)$$

Para facilitar el estudio, se fijará este parámetro en el valor correspondiente a la mitad de la longitud de onda de la línea *microstrip*.

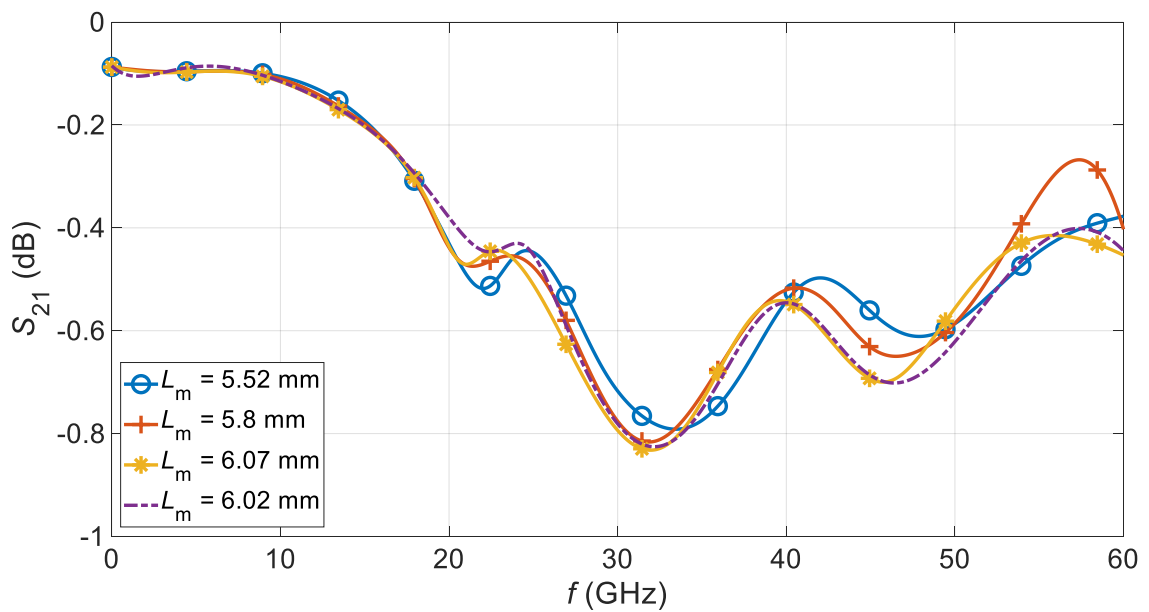
Mientras que para el parámetro  $L_m$ , se partirá el estudio del criterio que se expone en la ecuación (2.23).

$$L_m > \frac{3 \times \lambda_m}{4} \quad (2.23)$$

En la Figura 2.32 se presenta el comportamiento circuital de la estructura de alimentación antipodal en función del valor que posee el largo de la línea *microstrip*.



a)



b)

**Figura 2.32** Estudio del largo de la línea *microstrip* de la estructura de alimentación antipodal. a)  $S_{11}$ . b)  $S_{21}$ .

Por medio de simulaciones se logró establecer el valor más apropiado para el parámetro analizado. En la Tabla 2.23 se detalla los valores de cada parámetro que conforma a esta estructura de alimentación.

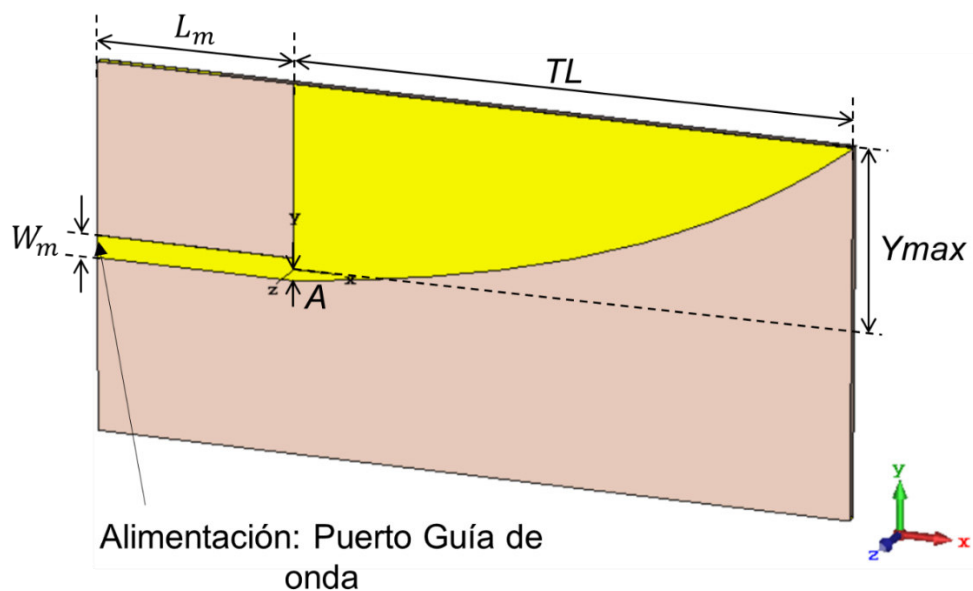
**Tabla 2.23** Dimensiones de la estructura de alimentación antipodal.

Parámetro	Descripción	Valor
$L_m$	Largo de la línea <i>microstrip</i>	6,02 mm
$W_m$	Ancho de la línea <i>microstrip</i>	0,7126 mm
$L_{plano}$	Largo del plano de masa	3,68 mm
$W_{sust}$	Ancho del sustrato/plano de masa	11,06 mm
$p2$	Tasa de apertura para la curva exponencial de los <i>striplines</i>	-1,173

### 2.3.2 DISEÑO DE ESTRUCTURA DE APERTURA – ANTENA VIVALDI ANTIPODAL

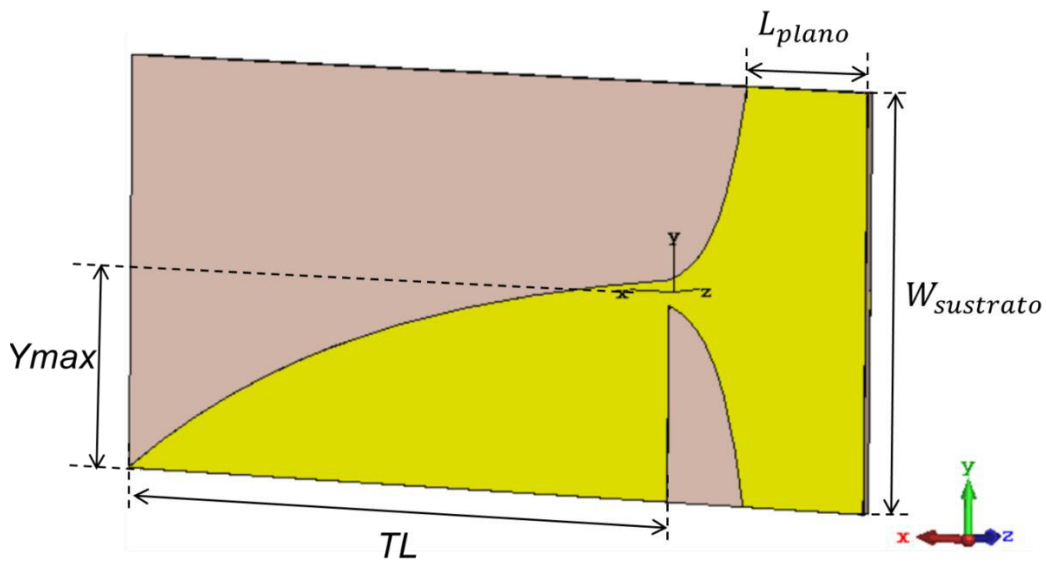
Una vez obtenida la estructura de alimentación definida, se incorpora la estructura de apertura para conformar la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

La Figura 2.33 muestra la antena Vivaldi con alimentación antipodal modelada



a)





b)

**Figura 2.33** Antena Vivaldi con alimentación antipodal modelada en CST Studio Suite.

a) Vista frontal. b) Vista posterior.

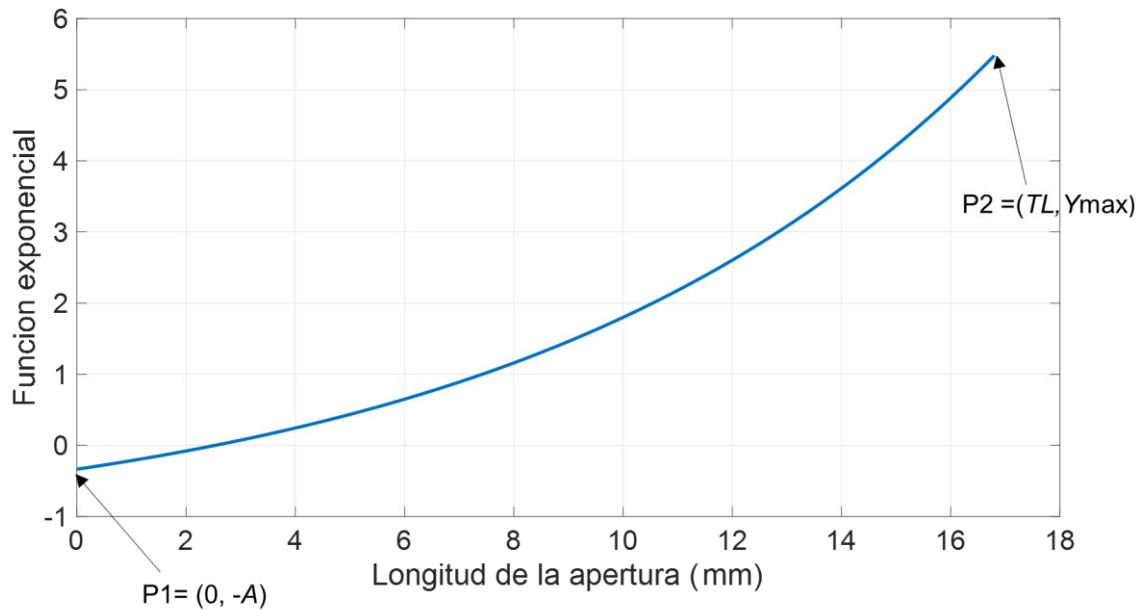
La antena modelada consiste en una capa de sustrato cuyas dimensiones rectangulares serán las adecuadas para que abarque tanto a la estructura radiante como a la estructura de alimentación, pero con su espesor característico representado por el parámetro  $h$ . En la cara superior del sustrato descansa una lámina de cobre de espesor  $t$ , esta lámina posee una forma definida por el perfil de apertura de una función exponencial la cual representa a la sección radiante de la antena, mientras que en la sección de alimentación, esta lámina metálica contendrá la línea *microstrip* diseñada. En la cara opuesta del sustrato se encuentra otra lámina de cobre, la cual posee la apertura definida por la misma función exponencial pero precedida por el signo menos en la sección radiante, además para la estructura de alimentación la lámina tiene la forma del plano de masa con sus respectivas *striplines*.

La expresión exponencial que definen a la estructura radiante es la dada en la ecuación (2.24)

$$y(t) = \mp A + e^{p \times t} + B \quad (2.24)$$

En donde la variable  $B$  toma el valor constante de  $-1$  para poder empezar la curva en el punto de transición entre las estructuras de alimentación y de radiación.

La curva exponencial que representa a la ecuación (2.24) se visualiza en la Figura 2.34.



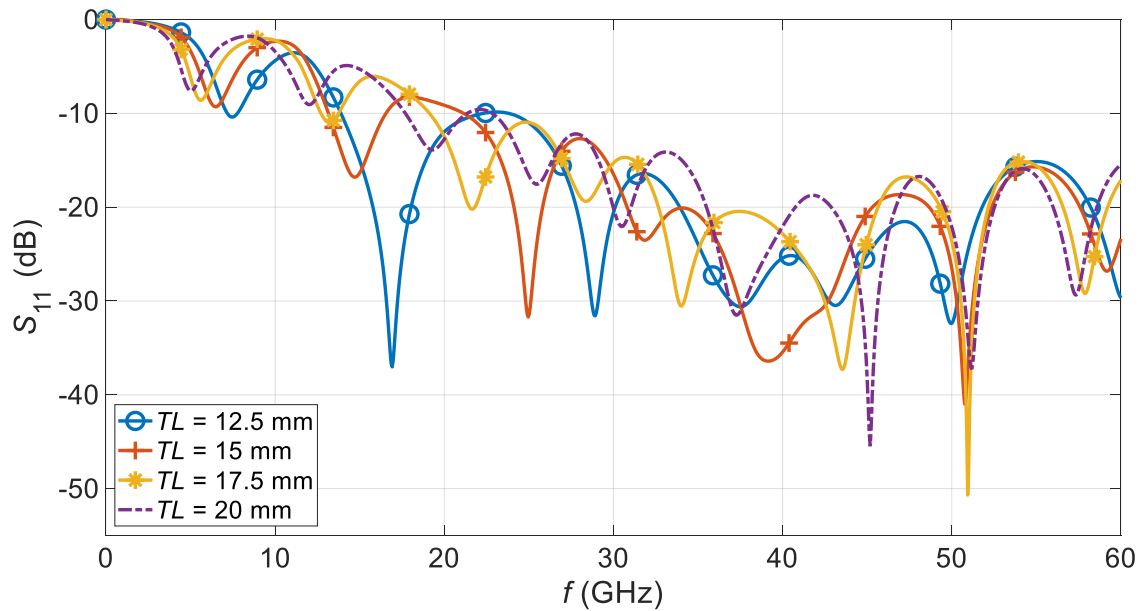
**Figura 2.34** Curva exponencial para sección de apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

Tal como se lo realizó para la sección 2.2.2, este estudio se enfocará en encontrar las coordenadas del segundo punto que define a la estructura de apertura, ya que las coordenadas del primer punto son conocidas. En este caso el parámetro  $A$  representa la mitad del ancho de la línea *microstrip*.

Los criterios para la determinación de los parámetros de interés serán los mismos que se han utilizado para el estudio de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* diseñada.

Para el estudio correspondientes a las coordenadas del segundo punto que define a la apertura exponencial, se realiza el procedimiento realizado anteriormente, es decir, en primer lugar, se variará la longitud de la apertura por medio del incremento del valor del parámetro *factorTL* manteniendo fijo al valor del parámetro  $Y_{\max} = 2,75$  mm.

De igual manera, el parámetro *factorTL* tomará valores enteros a partir de cinco. Las gráficas que se observan en la Figura 2.35 indican el parámetro  $S_{11}$  que se obtiene cuando la estructura radiante presenta un cierto valor en la longitud de su estructura de apertura.



**Figura 2.35** Variación de la longitud de la apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal. Parámetro  $S_{11}$ .

A continuación, en la Tabla 2.24 y Tabla 2.25 se detalla las características circuitales y radiantes obtenidas en la variación de este parámetro. Con ello se realiza una comparación con el fin de escoger el mejor valor para la longitud de la apertura.

**Tabla 2.24** Características circuitales. Variación de la longitud de la apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

$TL$ (mm)	Frecuencia (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
12,5	28,92	-29,39	23,59	-	-	-
15	31,86	-23,52	21,14	-	-	-
17,5	28,38	-19,37	19,12	-	-	-
20	30,48	-22,06	22,83	-	-	-

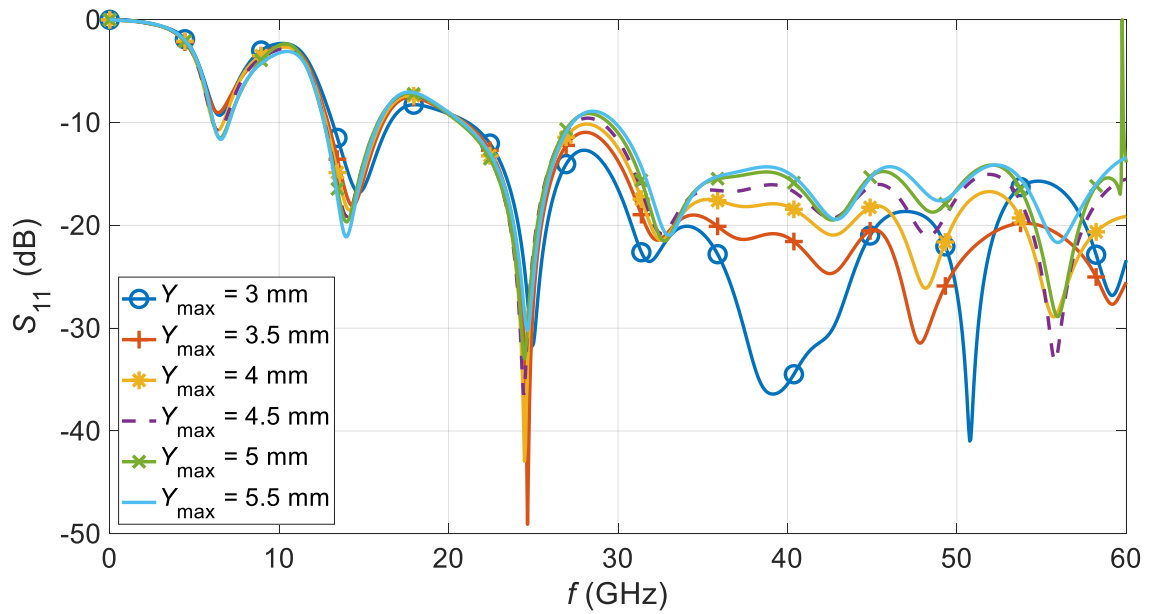
**Tabla 2.25** Características radiantes. Variación de la longitud de la apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

<b>TL (mm)</b>	<b>Directividad (dBi)</b>	<b>Ganancia (dBi)</b>	<b>Eficiencia de radiación (%)</b>
12,5	8,04	7,91	97,02
15	9,01	8,87	96,93
17,5	8,56	8,40	96,42
20	9,40	9,24	96,30

Al analizar la Figura 2.35, y al corroborar la información que se presenta en la Tabla 2.24, se observa que se obtiene un *notch* cercano a 30 GHz cuando el parámetro *TL* tiene el valor de 17,5 mm o 20 mm. Pero, con el valor de 20 mm para esta dimensión, la antena presenta dimensiones desproporcionales con respecto a su estructura de alimentación. Por otro lado, si se observa las características radiantes del valor de 17,5 mm para la longitud de la apertura, el valor de directividad presenta una magnitud aceptable pero no es el mejor que se obtuvo al realizar este estudio.

Al descarta la opción de 20 mm por sus dimensiones y también la opción de 17,5 mm por las características radiantes que la antena presenta; se trabajará con el valor 15 mm para este parámetro, ya que con este valor la antena presenta mejores características radiantes; además, la estructura de apertura posee dimensiones adecuadas para una antena *mmWave*, y finalmente, en término circuitales por medio de un ajuste en este valor, se puede lograr una antena cuyo punto mínimo de resonancia sea a la frecuencia de 30 GHz.

Con el valor del parámetro que representa la longitud de la apertura determinado, se empieza con el estudio de la variación de la mitad de la anchura final de la apertura, para lo cual se variará el parámetro  $Y_{max}$  desde el valor inicial que se le asignó hasta el valor de  $W_{substrato}$ . Las gráficas que se observan en la Figura 2.36 indican el parámetro  $S_{11}$  que se obtiene cuando la estructura radiante presenta un cierto valor en el parámetro  $Y_{max}$ .



**Figura 2.36** Variación del parámetro que define la mitad del ancho final de la apertura con el valor de la longitud de la apertura igual a 15 mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal. Parámetro  $S_{11}$ .

Para una mejor comprensión del análisis efectuado, se detalla en la Tabla 2.26 y Tabla 2.27 las características circuitales y radiantes.

**Tabla 2.26** Características circuitales. Variación del parámetro que define la mitad del ancho final de la apertura con el valor de la longitud de la apertura igual a 15 mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

$Y_{\max}$ (mm)	Frecuencia (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
2,75	31,86	-23,52	21,14			
3,5	32,34	-21,44	20,94	-	-	-
4	32,58	-21,45	20,85	-	-	-
4,5	32,58	-20,82	29,00	-	-	-
5	32,76	-21,52	29,44	-	-	-
5,5	33,00	-20,97	29,81	-	-	-

**Tabla 2.27** Características radiantes. Variación del parámetro que define la mitad del ancho final de la apertura con el valor de la longitud de la apertura igual a 15 mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

$Y_{\max}$ (mm)	Directividad (dBi)	Ganancia (dBi)	Eficiencia de radiación (%)
2,75	9,01	8,87	96,93
3,5	9,15	9,00	96,54
4	9,20	9,06	96,72
4,5	9,28	9,13	96,72
5	9,34	9,19	96,59
5,5	9,37	9,22	96,53

En esta ocasión se enfocará en los datos de las características radiantes para la elección del valor del parámetro que se está analizando, ya que posteriormente a la elección, se debe ajustar el valor de la longitud de la apertura para efectivamente lograr el objetivo circuital en esta antena. Al analizar la Tabla 2.27, se observa que la estructura presenta las mejores características radiantes cuando el valor de la mitad de la apertura final es 5,5 mm.

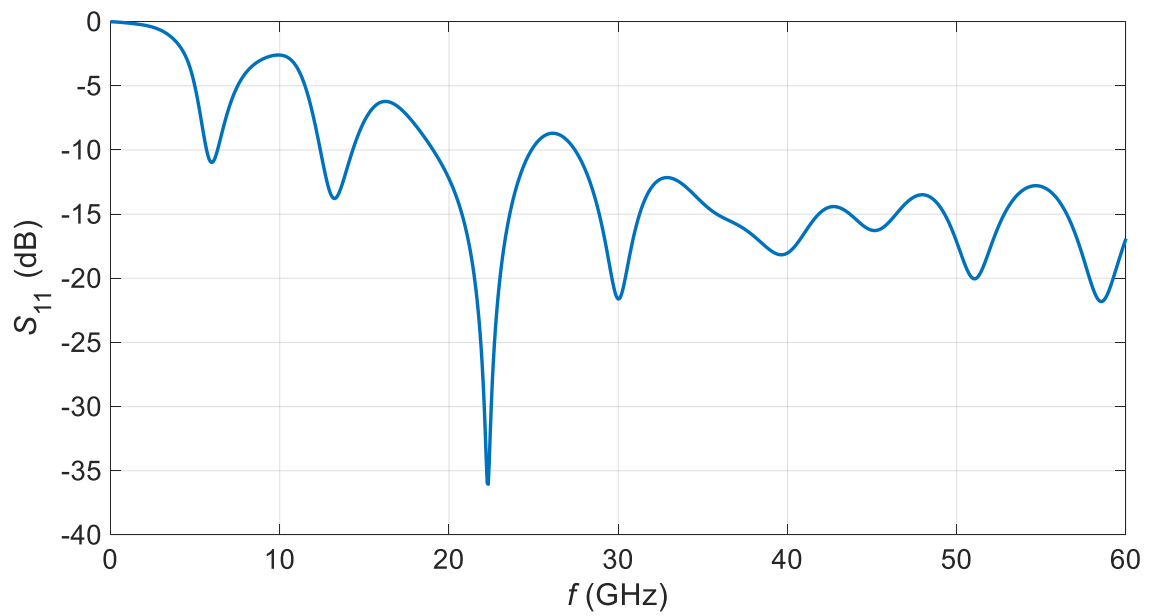
Con el valor del parámetro que representa la mitad de la anchura final de la apertura de la antena Vivaldi antipodal determinado, se procede a realizar el ajuste del largo de la apertura de la estructura para poder obtener el punto mínimo de un *notch* a la frecuencia de interés. Al observar nuevamente la Figura 2.36, es necesario aumentar el valor de la longitud de la apertura para que el *notch* más cercano a la frecuencia de 30 GHz se coloque a dicha frecuencia.

Mediante la metodología empleada para esta estructura, se detalla en la Tabla 2.28 los valores de las dimensiones que conforman a la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

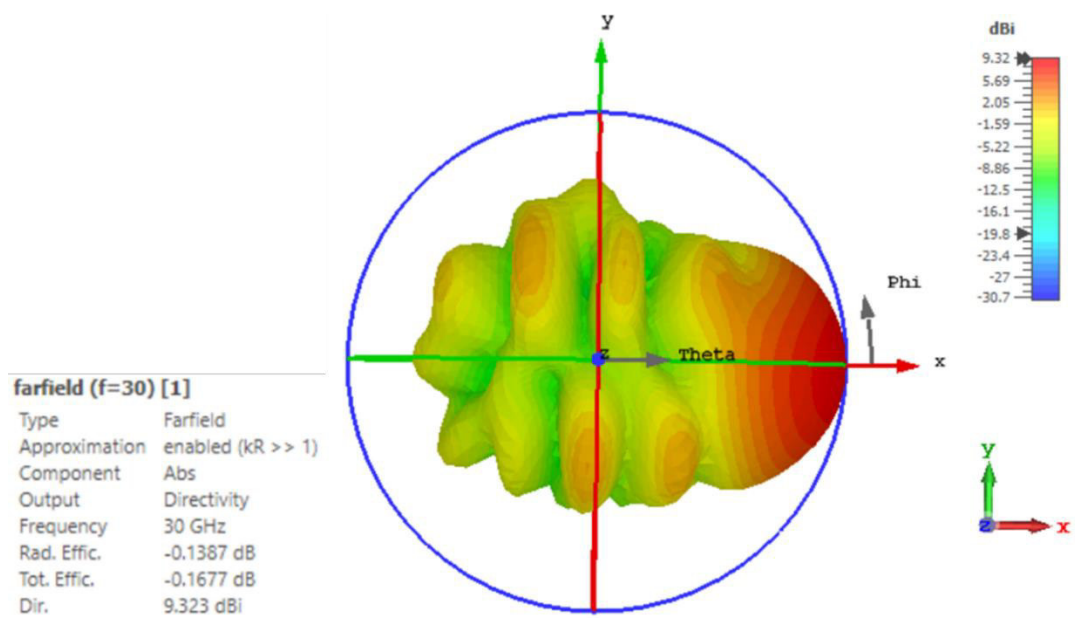
**Tabla 2.28** Dimensiones de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

Parámetro	Descripción	Valor
$W_{\text{sustrato}}$	Ancho del sustrato	11,06 mm
$h$	Espesor del sustrato	0,254 mm
$t$	Espesor de la capa de metal	0,0017 mm
$L_m$	Longitud de la línea <i>microstrip</i>	6,02 mm
$W_m$	Ancho de la línea <i>microstrip</i>	0,7126 mm
$L_{\text{plano}}$	Longitud del plano de masa	3,68 mm
$p2$	Tasa de apertura de <i>striplines</i>	-1,173
$A$	Mitad del ancho de la <i>microstrip</i>	0,335 mm
$TL$	Longitud de la apertura	16,825 mm
$Y_{\text{max}}$	Mitad del ancho de la apertura final	5,5 mm
$TW$	Ancho de la apertura	11 mm
$p1$	Tasa de apertura de la estructura de apertura	0,1144

Con los valores de las dimensiones mostrados en la Tabla 2.28, la antena Vivaldi antipodal diseñada presenta el siguiente comportamiento circuital que se observa en la Figura 2.37 y radiante que se observa en la Figura 2.38; es importante mencionar que para la vista cartesiana normalizada, el corte es para  $\theta = 90^\circ$ .

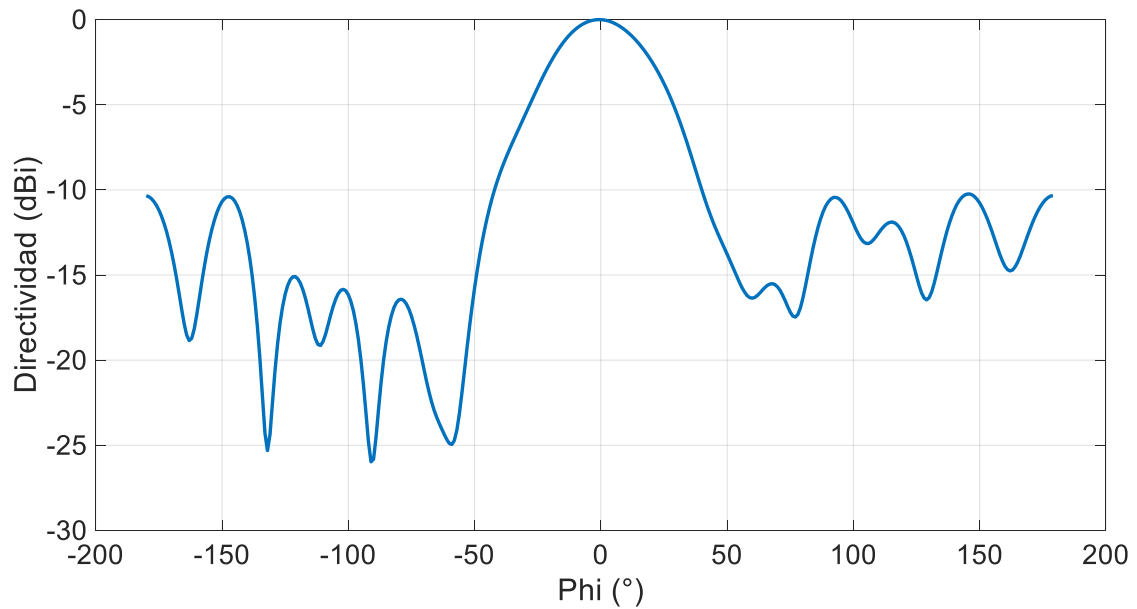


**Figura 2.37** Antena Vivaldi con alimentación antipodal. Parámetro  $S_{11}$ .



a)





b)

**Figura 2.38**, Antena Vivaldi con alimentación antipodal. Patrón de radiación  
a) Directividad vista tridimensional. b) Directividad vista cartesiana normalizada. Corte  
 $theta = 90^\circ$ .

### 2.3.3 ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA

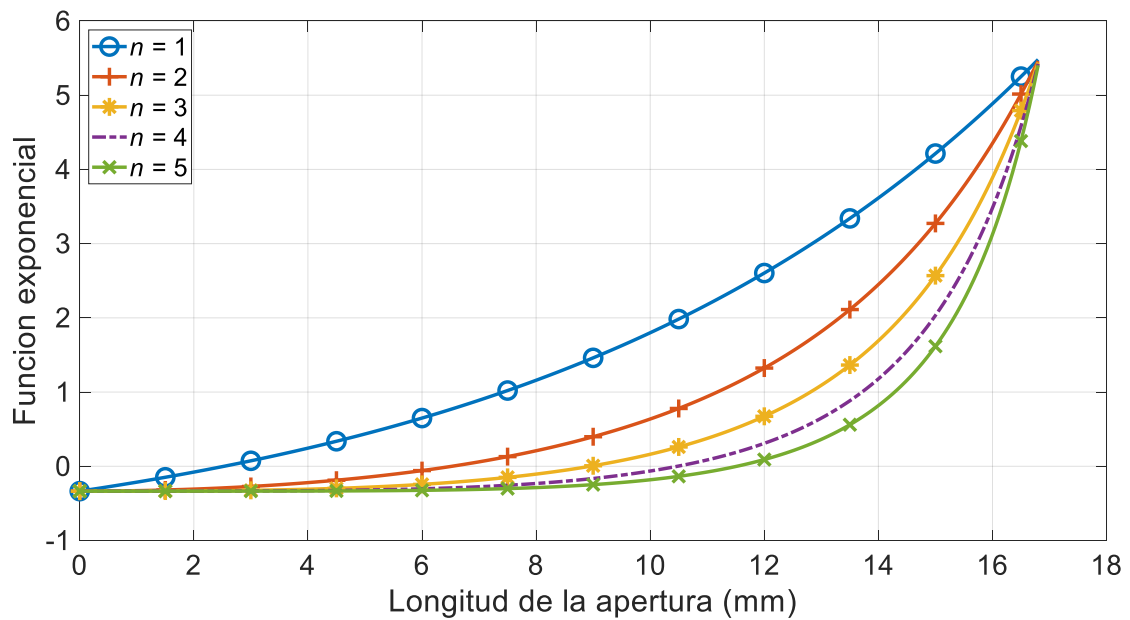
En esta sección se variará el perfil de la apertura de la antena Vivaldi antipodal con el fin de obtener una familia de curvas exponenciales entre los puntos que limitan a la estructura radiante. También se creará una apertura lineal entre los mismos puntos para incluir a este estudio el análisis de una antena LTSA antipodal.

El objetivo del presente estudio es observar las variaciones de las características de la antena en términos circuitales y radiantes al modificar su perfil de apertura.

La familia de curvas exponenciales se logra mediante la modificación de la ecuación (2.24), para ello se agrega una nueva variable la cual tomará valores de 1 a 5, y por medio de su valor se definirá las diferentes curvas. La expresión que define a la familia de curvas exponenciales se observa en la ecuación (2.25)

$$y(t) = \mp A + e^{p \times t^n} + B \tag{2.25}$$

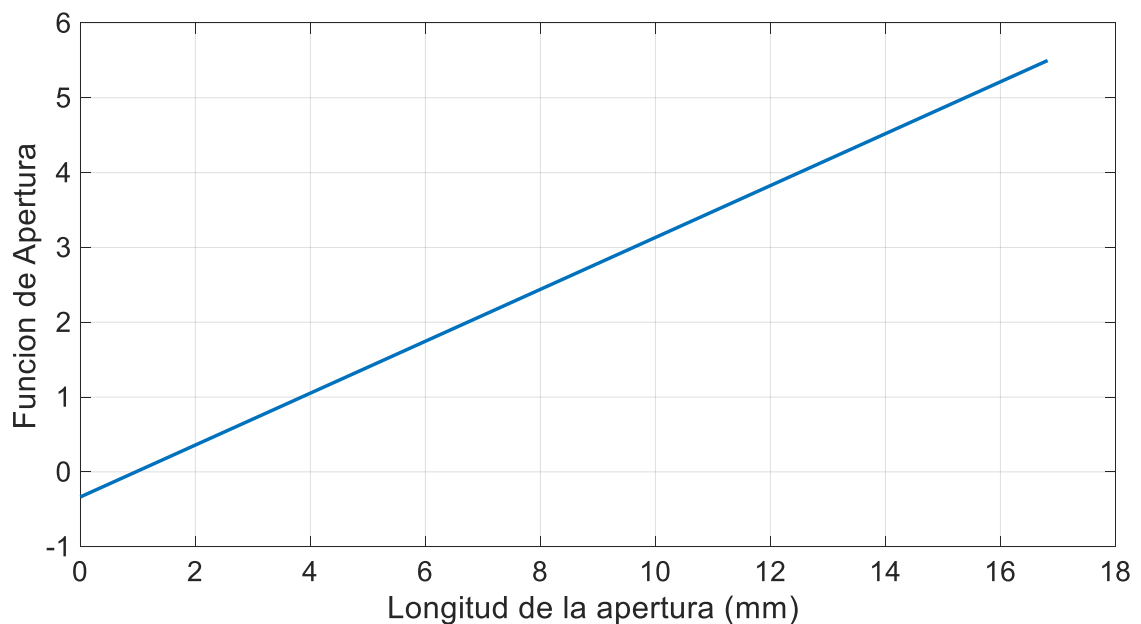
Por medio de la ecuación (2.25), la Figura 2.39 indica la familia de curvas exponenciales con las que se realizará el estudio.



**Figura 2.39** Familia de curvas exponenciales para la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

Por su lado, la apertura lineal se definirá mediante la ecuación de la recta con su respectiva pendiente que une los dos puntos que delimitan a la estructura radiante.

La Figura 2.40 indica el perfil de la recta que conformará la antena LTSA.



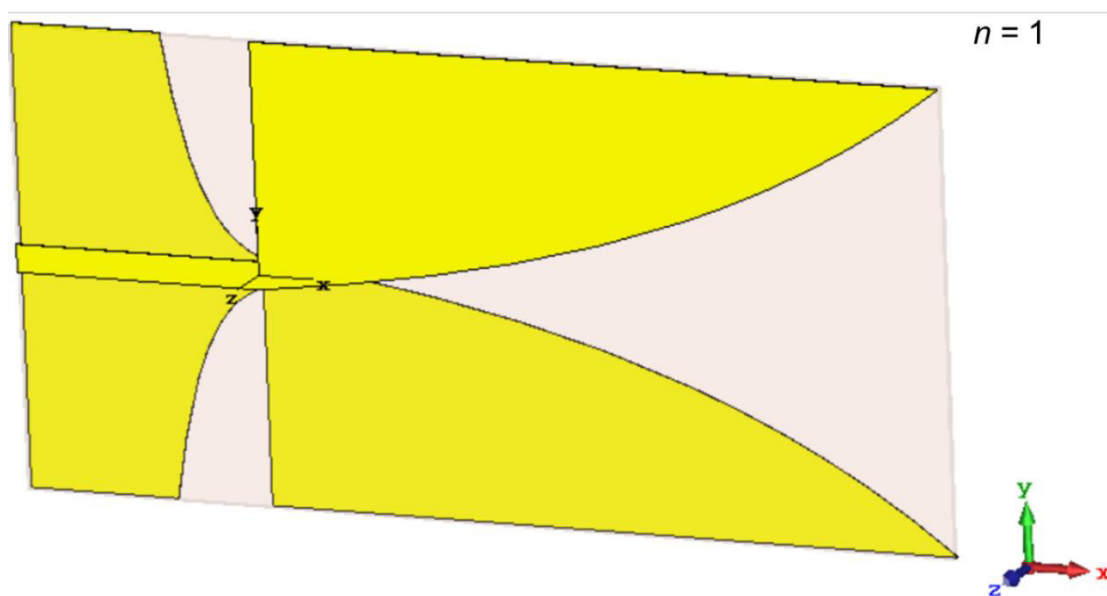
**Figura 2.40** Perfil de apertura lineal para la antena LTSA con alimentación antipodal.

El proceso de modelado para este estudio se realizará de la misma manera que se lo realizó para la antena Vivaldi de la sección 2.2.2.

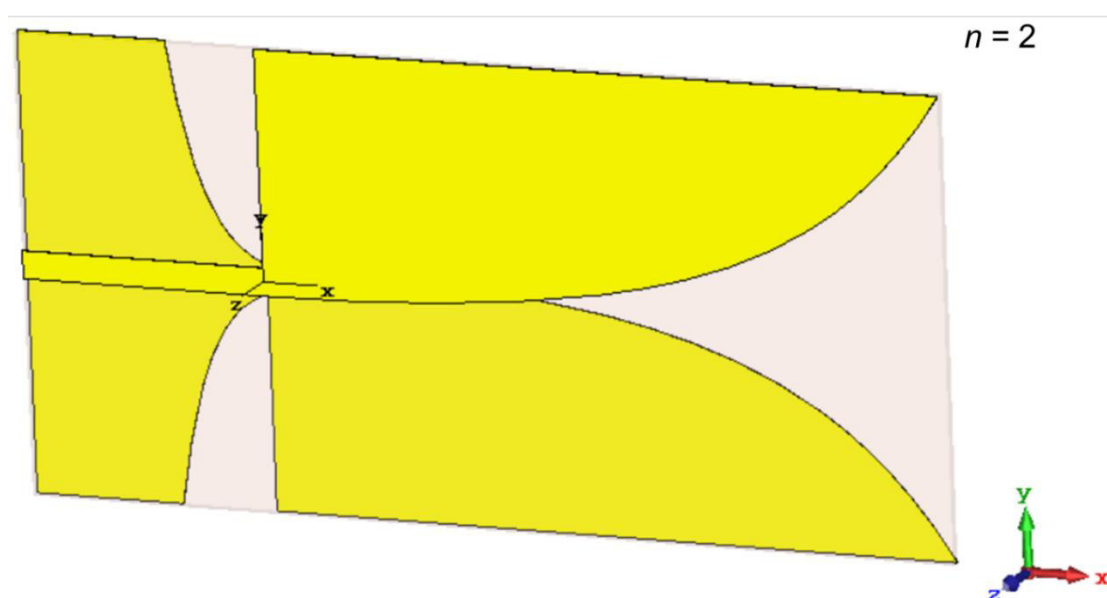
A continuación, se presenta las diferentes antenas Vivaldi con alimentación antipodal diferenciadas por su estructura de apertura exponencial, así como también la antena LTSA antipodal.

Es importante recordar que en esta antena las estructuras de apertura se encuentran en lados opuestos del sustrato.

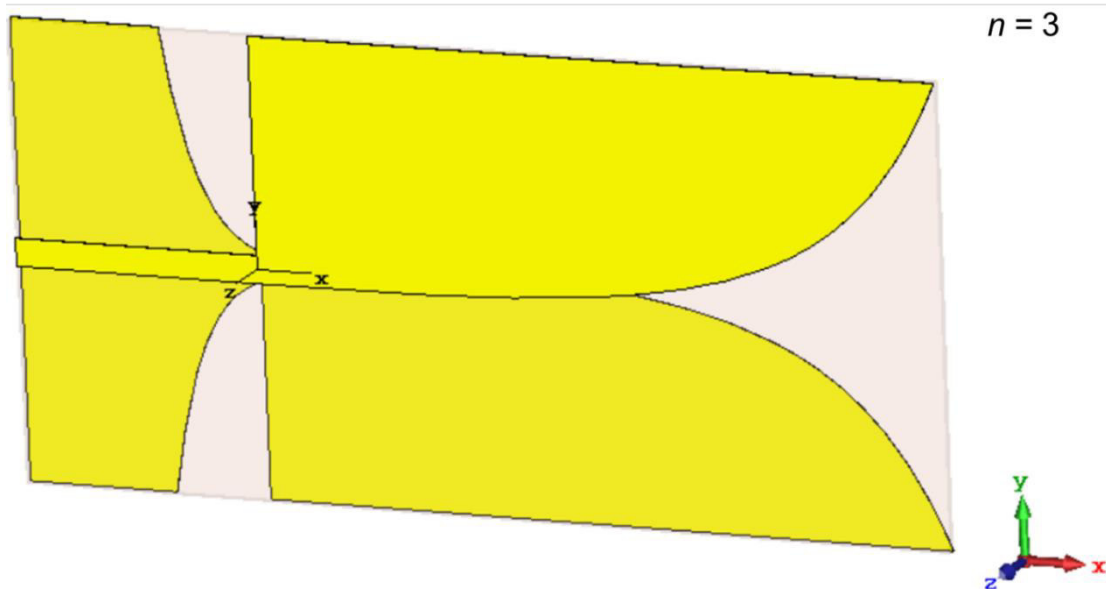
La Figura 2.41 presenta las diferentes antenas Vivaldi diferenciadas por su estructura de apertura exponencial, así como también la antena LTSA.



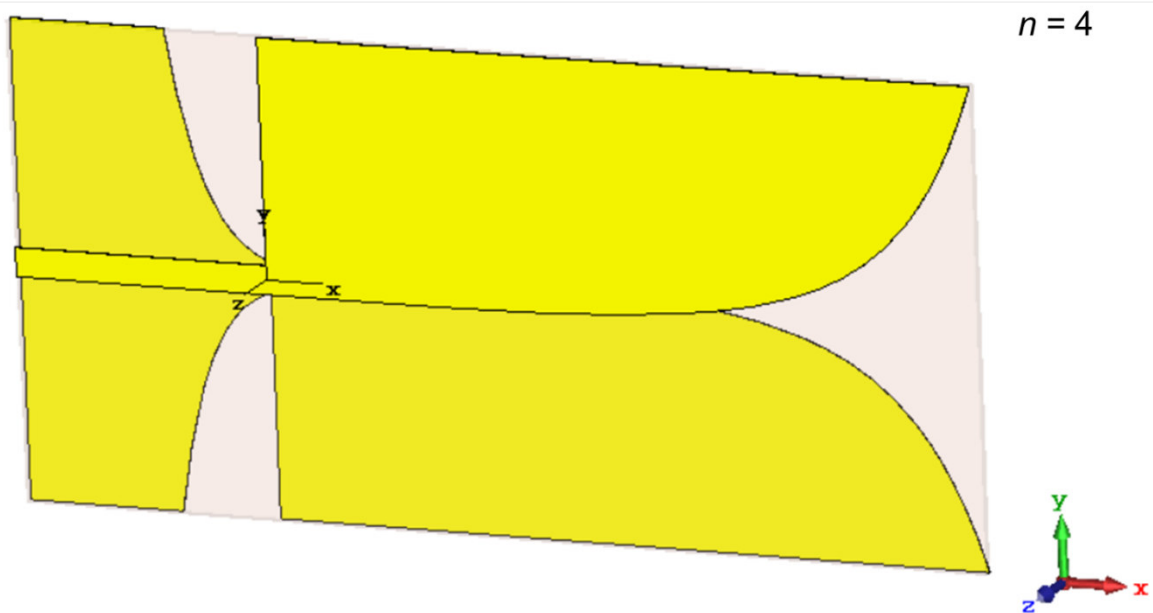
a)



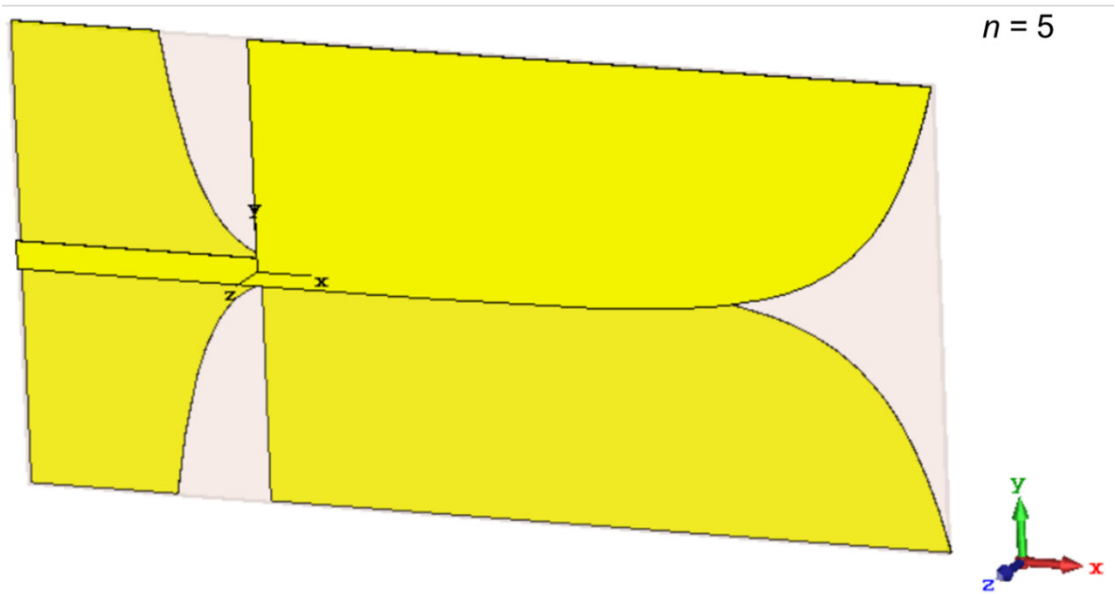
b)



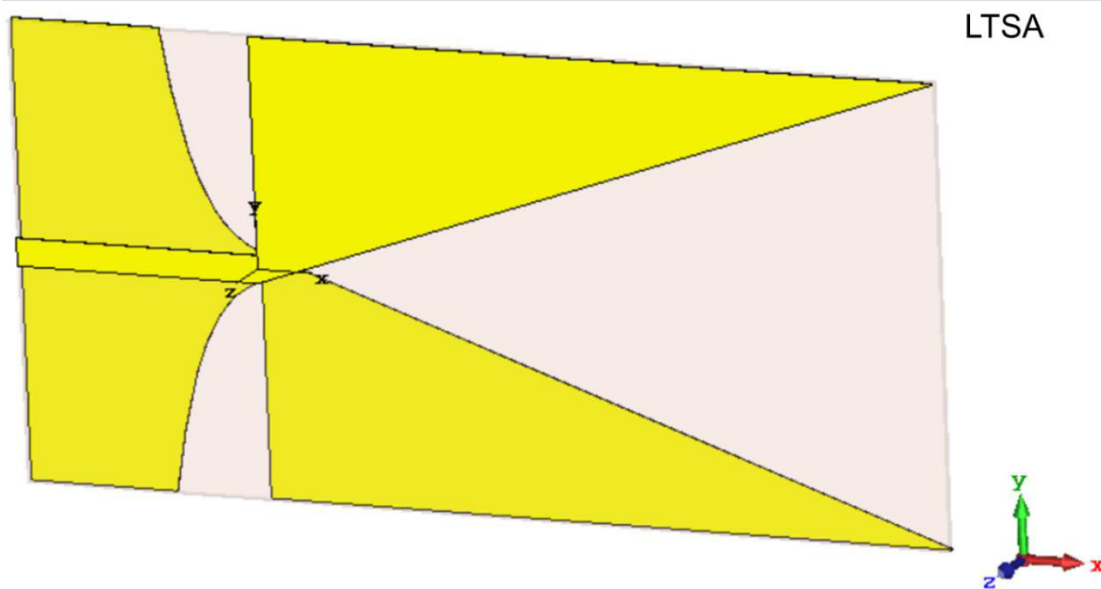
c)



d)



e)



f)

**Figura 2.41** Antenas Vivaldi con alimentación antipodal con diferentes perfiles en su estructura de apertura. Exponencial a)  $n=1$ . b)  $n=2$ . c)  $n=3$ . d)  $n=4$ . e)  $n=5$ .  
Lineal f) LTSA.

### 2.3.4 ESTUDIO DE CORRUGACIONES

En la presente sección se aborda el diseño de corrugaciones para la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

#### *Corrugaciones Externas*

El objetivo de este programa es encontrar los valores óptimos de las estructuras rectangulares que representan a las corrugaciones para que la antena Vivaldi antipodal diseñada mejore sus características de radiación, procurando que la nueva antena mantenga su ancho de banda operativo y relativo dentro de los valores apropiados para poder catalogarla a la antena como antena de banda ancha.

A diferencia del estudio realizado en la anterior antena, las corrugaciones en el diseño actual no se extenderán en todo el largo de la estructura de apertura, ya que la curva exponencial se extiende hasta el final de la estructura en el eje Y. Es por ello que las corrugaciones llegarán hasta un punto máximo en el cual no interfiere con la apertura exponencial.

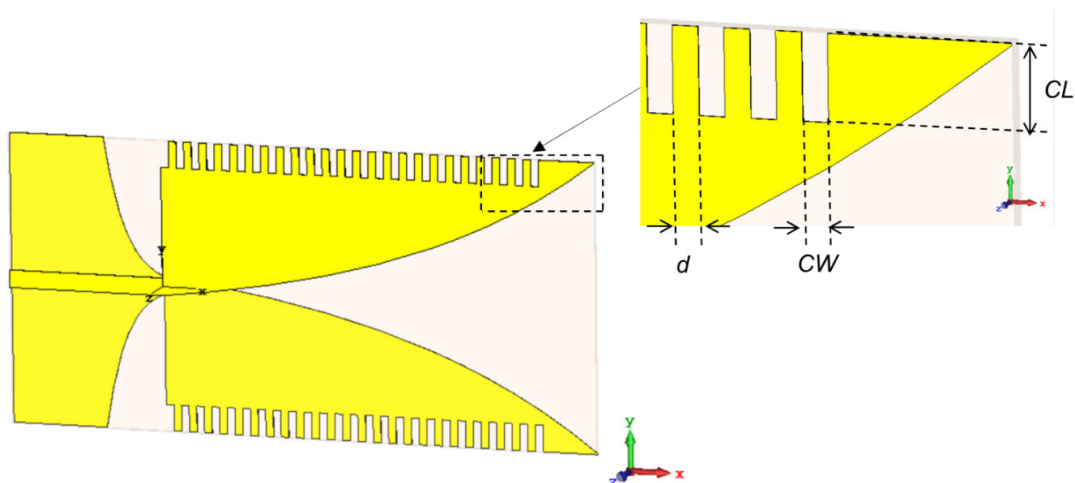
Para el diseño de las dimensiones se utilizará los mismos criterios expuestos para las estructuras diseñadas en la sección 2.2.4.

En esta ocasión la antena Vivaldi con alimentación antipodal original trabaja en un ancho de banda operacional cuya frecuencia de corte inferior es  $f_{\min} = 27,45$  GHz; mientras que para la frecuencia superior fuera del ancho de banda de operación se escoge 200 GHz.

Al aplicar los valores de frecuencia expuestos a los criterios, se tiene los siguientes valores de partida para el diseño presente.  $CW < 2,00$  mm,  $d < 2,00$  mm.

Para el largo de las corrugaciones se tiene:  $2,73$  mm  $< CL < 0,75$  mm.

El modelado de esta estructura es similar al ya presentado en el anterior estudio de estos elementos. La antena antipodal con corrugaciones externas modelada se presenta en la Figura 2.42.



**Figura 2.42** Antena Vivaldi con alimentación Antipodal con corrugaciones externas.

En base a la experiencia adquirida en el diseño de las corrugaciones exteriores para la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*; para este estudio se realizará el mismo procedimiento, es decir, se variará el ancho de las corrugaciones para los diferentes valores que se tendrá en el parámetro que representa a la longitud de las misma. Las características radiantes que presenta la antena al implementar la metodología expuesta se detallan en la Tabla 2.29, Tabla 2.30 y Tabla 2.31.

**Tabla 2.29** Variación del ancho de la corrugación con  $CL=1$  mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

$CW$ (mm)	$CL$ (mm)	Número de corrugaciones	Directividad (dBi)	Relación frente-atrás (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Dirección lóbulo principal (°)	Anchura angular (°)	Nivel de lóbulo lateral (dB)
0,3	1	26	11,34	20,45	96,72	0	35,9	-15,6
0,4	1	19	11,49	17,66	96,64	0	34,00	-15,2
0,5	1	15	11,55	15,21	96,53	0	32,7	-14,3

**Tabla 2.30** Variación del ancho de la corrugación con  $CL=1,5$  mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Número de corruga- ciones</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Rela- ción frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- churaa ngu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbu- lo late- ral (dB)</b>
0,3	1,5	25	10,59	26,38	96,42	0	42,6	-14,9
0,5	1,5	15	10,63	16,12	93,35	-1	39,6	-13,1

**Tabla 2.31** Variación del ancho de la corrugación con  $CL=2$  mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

<b>CW (mm)</b>	<b>CL (mm)</b>	<b>Número de corruga- ciones</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Rela- ción frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficien- cia de radia- ción (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- churaa ngu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbu- lo late- ral (dB)</b>
0,3	2	23	10,04	21,22	96,99	0	49,1	-12,3
0,5	2	14	10,00	20,84	96,95	-1	49,1	-11,9

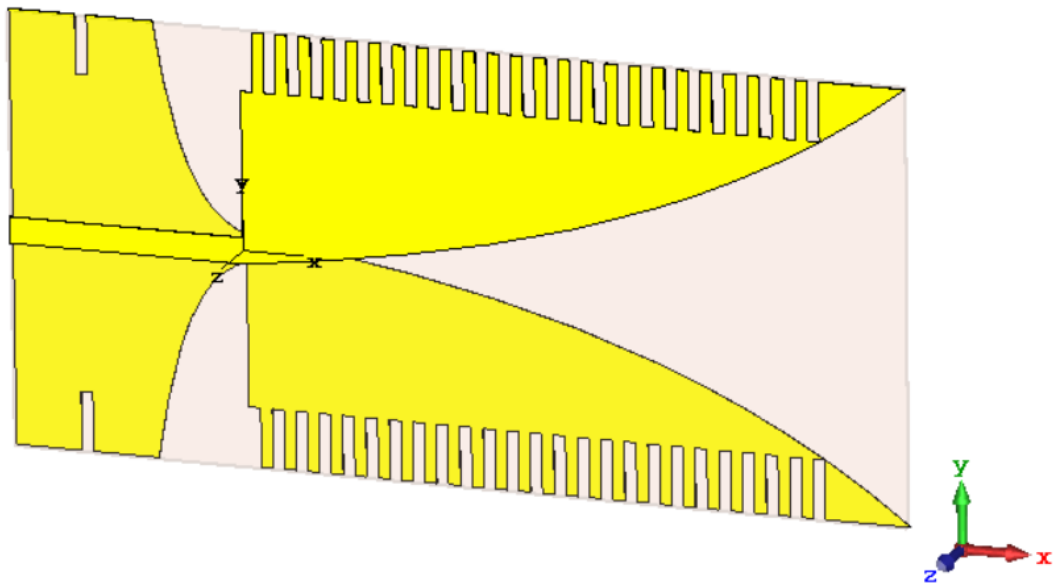
Por medio de esta metodología se logró obtener dos pares de valores para las dimensiones de las corrugaciones en este elemento radiante. Cada par de dimensiones mejora en mayor medida a cierta característica radiante de mayor interés. Los valores mencionados se presentan en la Tabla 2.32.



**Tabla 2.32** Dimensiones de corrugaciones externas de antena Vivaldi antipodal.

Parámetro	Descripción	Valor 1 (mm)	Valor 2 (mm)
$CL$	Altura de la corrugación	1	1,5
$CW$	Ancho de la corrugación	0.4	0,3
$d$	Separación entre corrugaciones	0.4	0,3

Con estas dimensiones, se optó por incrementar dos corrugaciones adicionales en la mitad del plano de masa, una en cada extremo del plano tal como se observa en la Figura 2.43. El objetivo es analizar si la presencia de estas estructuras mejora aún más las propiedades radiantes de la antena.



**Figura 2.43** Antena Vivaldi con alimentación antipodal con corrugaciones externas en su perfil de apertura y en su plano de masa.

Para el estudio realizado, en todos los casos se cumple que el elemento es una antena de banda ancha.

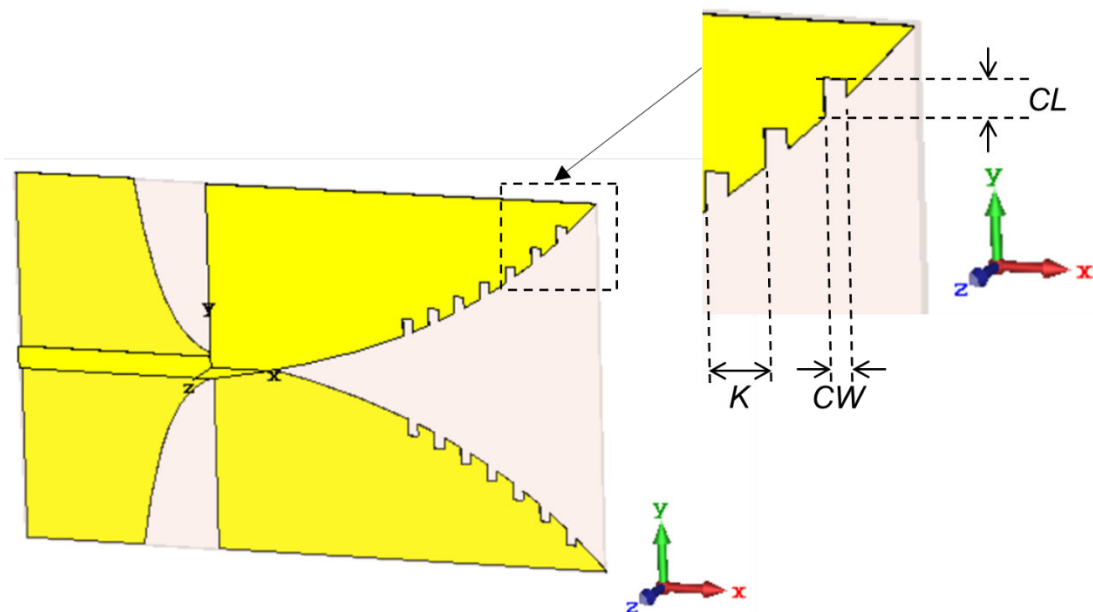
### Corrugaciones Internas

Mediante el presente estudio se miniaturizará a la antena Vivaldi con alimentación antipodal mediante la aplicación de corrugaciones en el interior de la estructura radiante. Con las dimensiones adecuadas de las corrugaciones se busca reducir el largo de la estructura radiante de la antena al menos en un 20%. Para este objetivo se debe procurar que las características radiantes de la antena miniaturizada tengan máximo un margen de error del 5% con respecto a las características radiantes de la antena original. Además, se pretende que la antena antipodal miniaturizada presente un ancho de banda relativo mayor al 20% y un ancho de banda absoluto mayor que 500 MHz para poder clasificar a la antena como elemento de banda ancha.

Los criterios a utilizar en esta sección serán los siguientes:  $CW < 2,00$  mm,  $d < 2,00$  mm y  $2,73$  mm  $< CL < 0,75$  mm.

El proceso de modelamiento será el mismo que se realizó en el diseño de corrugaciones internas para la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotlines*, es decir, que para el estudio de este modelo se aplicará del concepto de periodicidad.

La antena Vivaldi antipodal miniaturizada se presenta en la Figura 2.44.



**Figura 2.44** Antena Vivaldi con alimentación Antipodal miniaturizada.

La metodología que se implementa en esta sección se describe a continuación.

En primer lugar y en base al diseño de corrugaciones para la miniaturización de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*, se fija las dimensiones del ancho y de la longitud de la corrugación en los valores de 0,3 mm y 0,5 mm respectivamente, además el valor de la periodicidad se fija en 1 mm. El primer estudio se enfoca en encontrar el nuevo valor de la longitud de la estructura radiante que correspondería a la estructura ya miniaturizada.

Los valores con los cuales se realizará este estudio para determinar el largo de la antena miniaturizada son 12,5 mm, 12 mm y 11,5 mm. Las características radiantes para este estudio se presentan en la Tabla 2.33.

**Tabla 2.33** Variación de la longitud de la apertura de la antena con  $CW = 0,3$  mm,  $CL = 0,5$  mm y  $K = 1$  mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

<b>TL (mm)</b>	<b>Directi- vidad (dBi)</b>	<b>Relación frente- atrás (dB)</b>	<b>Eficiencia de radiación (%)</b>	<b>Direc- ción lóbulo princi- pal (°)</b>	<b>An- chura angu- lar (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>	<b>Ancho de banda relati- vo (%)</b>
12,5	8,83	9,65	96,74	-1	43,6	-9,1	21,46
12,0	8,83	10,68	96,99	-1	44,5	-10,1	21,49
11,5	8,79	12,23	97,48	-1	44,3	-11,0	20,76

Al analizar la Tabla 2.33, se observa que el valor para la longitud de la apertura de la antena miniaturizada que presenta características radiantes similares a la antena original es el valor de 12 mm. Es por ello que el diseño de corrugaciones se realizará sobre esta magnitud.

El siguiente análisis involucra el estudio de la periodicidad. Para ello se realiza simulaciones con valores de periodicidad de 0,8 mm y 0,6 mm. Las características radiantes para cada caso se exponen en la Tabla 2.34.

**Tabla 2.34** Variación de la periodicidad entre cada corrugación con  $CW = 0,3$  mm,  $CL = 0,5$  mm de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

$k$ (mm)	Directi- vidad (dBi)	Relación frente- atrás (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Direc- ción lóbulo princi- pal (°)	An- chura angu- lar (°)	Nivel de lóbulo lateral (dB)	Ancho de banda relati- vo (%)
0,8	8,84	10,32	97,11	-1	44,4	-10,0	20,95
0,6	8,88	10,17	97,14	-1	44,0	-10,2	19,60

Al observar las características radiantes presentadas en la Tabla 2.34, se nota que en las dos situaciones ya se consigue valores muy cercanos a los que presenta la antena Vivaldi antipodal sin miniaturizar. A simple vista se decidiría por la opción de periodicidad de 0,6 mm ya que el valor de la característica de directividad se acerca en mayor medida al valor original; pero si se analiza el comportamiento circuital que presenta la antena miniaturizada con este valor de periodicidad, la antena no cumple con el valor objetivo que se planteó para el ancho de banda relativo, ya que el valor para esta característica es del 19,60%.

Se procede a realizar el estudio en las dimensiones de las corrugaciones con una periodicidad de 0,8 mm para obtener una mayor similitud con las características radiantes que presenta la antena Vivaldi antipodal original.

Por medio la metodología presentada, se logra obtener una antena Vivaldi miniaturizada con la aplicación de estructura corrugadas en el interior de su perfil de apertura. En la Tabla 2.35 se aprecia las dimensiones que conforman a las corrugaciones.

**Tabla 2.35** Dimensiones de corrugaciones internas de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor (mm)</b>
<i>CL</i>	Altura de la corrugación	0,5
<i>CW</i>	Ancho de la corrugación	0,4
<i>k</i>	Periodo de aparición de corrugaciones	0,8

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las diferentes estructuras modeladas, se procede a realizar un análisis y discusión de las diferentes antenas diseñadas, así como también de las modificaciones aplicadas a la estructura de radiación del elemento radiante.

Los resultados circuitales se analizan por medio de las gráficas de los Parámetros S, mientras que los resultados radiantes son analizados en campo lejano.

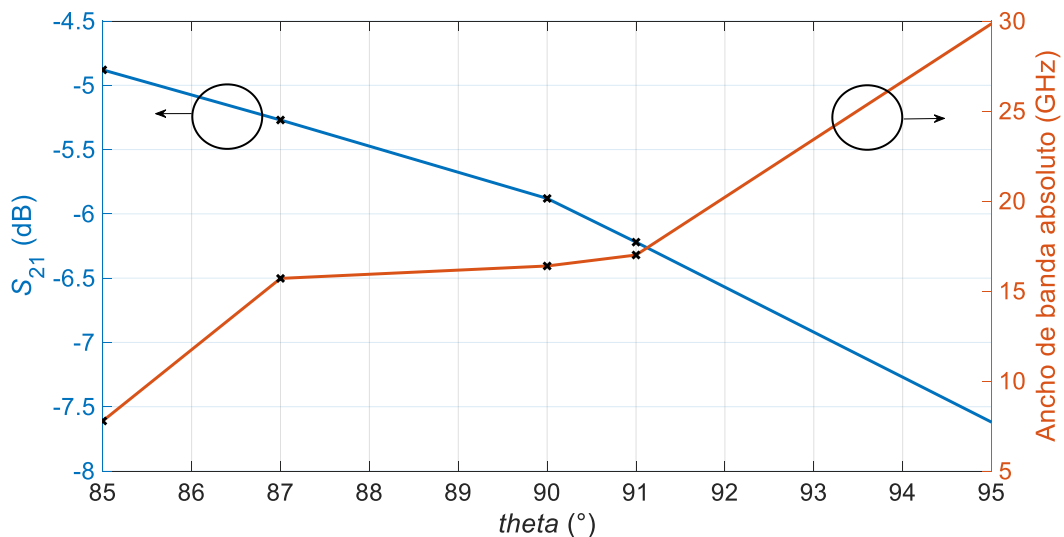
#### 3.1 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN POR TRANSICIÓN LÍNEA MICROSTRIP-SLOTLINE

A continuación, se analiza los resultados obtenidos en las diferentes estructuras que conforman a la antena Vivaldi con alimentación por transición línea *microstrip* - *slotline*.

##### 3.1.1 ESTRUCTURA DE ALIMENTACIÓN

Esta sección se refiere a los resultados del estudio del ángulo  $\theta$  de los stubs radiales de la estructura de alimentación indicada en la Figura 2.13

La Figura 3.1 ilustra el parámetro de transmitancia y el ancho de banda absoluto que presenta la estructura de alimentación en función al valor que posee el ángulo  $\theta$  de los stubs radiales.



**Figura 3.1** Parámetro  $S_{21}$  / Ancho de banda absoluto en función del ángulo de los stubs radiales en la estructura de alimentación transición *microstrip*-*slotline* con stubs radiales.

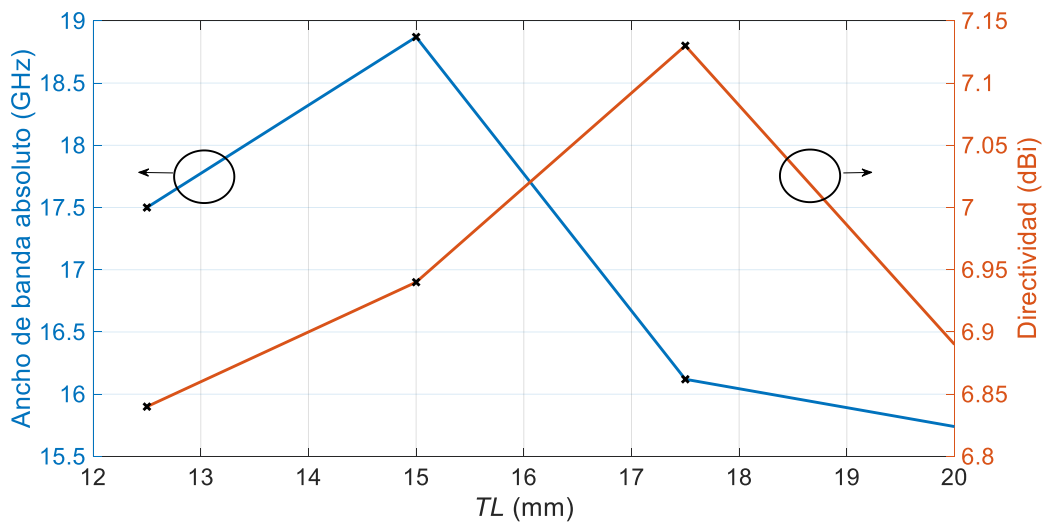
La Figura 3.1 indica la tendencia que posee el parámetro de transmitancia y el ancho de banda absoluto en esta estructura de alimentación. Se puede observar que, si mayor es el valor del ángulo  $\theta$ , mayor serán las pérdidas de retorno en la estructura. Además, se observa que, mientras mayor sea el valor del ángulo, la estructura presentará un mayor ancho de banda

### 3.1.2 ESTRUCTURA DE APERTURA

En la presente sección se analiza los resultados circuitales y radiantes del estudio de las dimensiones de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales diseñada en la sección 2.2.

En primer lugar, se analiza los resultados de la variación de la longitud de la estructura de apertura ( $TL$ ) para la antena de la Figura 2.19.

En la Figura 3.2 se ilustra el ancho de banda absoluto y la directividad que presenta la antena en función del valor que posee la longitud en su estructura de apertura.



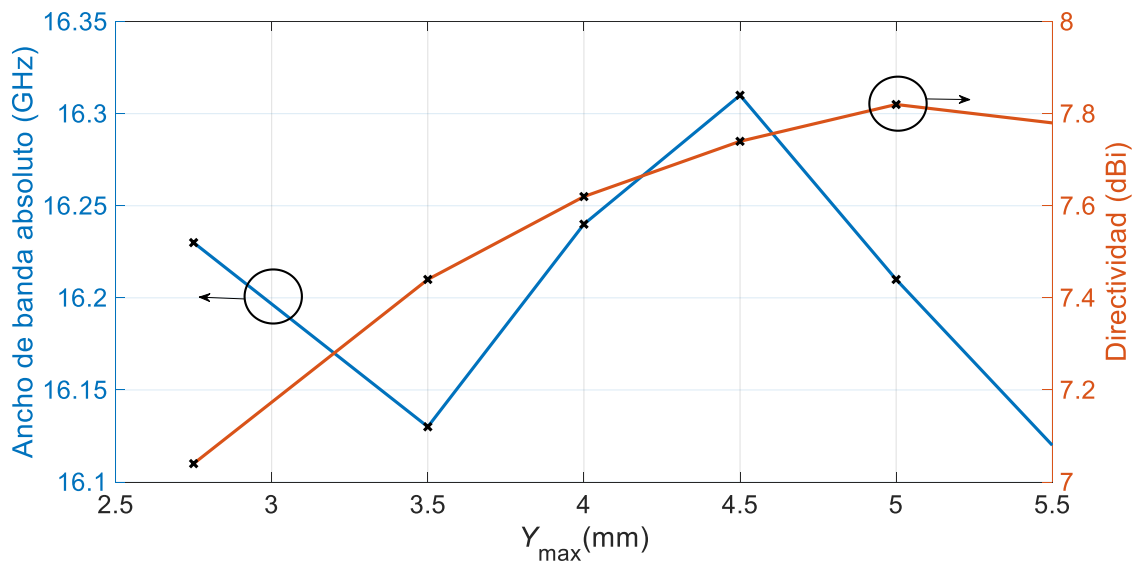
**Figura 3.2** Ancho de banda absoluto / Directividad. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales en función de la longitud de la estructura de apertura.

La Figura 3.2 indica que, en primer lugar, existe una tendencia creciente del ancho de banda hasta cuando el parámetro  $TL$  es 15 mm, en donde se tiene el mayor ancho de banda operativo de la estructura. A partir de dicho valor, el ancho de banda absoluto decrece mientras mayor sea el valor para la longitud de la estructura de apertura. Además, al analizar la directividad, se observa una tendencia creciente de la directividad que presenta el elemento radiante en los tres primeros valores de la longitud de la apertura

estudiados, a partir del valor de 17,5 mm donde la estructura presenta la mayor directividad, dicha característica radiante decrece.

En la presente sección también se analiza los resultados de la variación de la mitad de la anchura final de la estructura de apertura ( $Y_{\max}$ ) para la antena de la Figura 2.19.

En la Figura 3.3 se ilustra el ancho de banda absoluto y directividad que presenta la antena en función del valor que posee el parámetro que representa la mitad de la anchura final de la estructura de apertura.



**Figura 3.3** Ancho de banda absoluto / Directividad. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales en función de la variación del parámetro que representa a la mitad de la anchura final de la apertura.

La Figura 3.3 indica que no existe una tendencia clara en la relación entre el ancho de banda operativo del elemento radiante con el valor de la anchura final de la apertura de la antena, pero se puede apreciar que la antena presenta el mayor ancho de banda operativo cuando el valor del parámetro  $Y_{\max}$  es de 4,5 mm. Además, al observar la gráfica de directividad, se observa una tendencia creciente de esta característica radiante en función de la anchura final de la estructura de apertura de la antena.

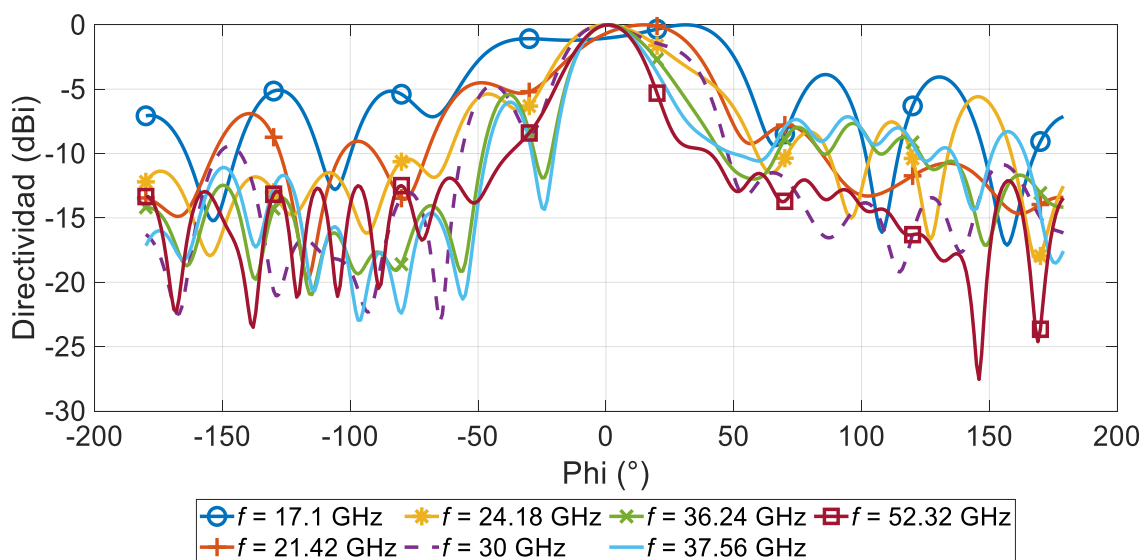


### 3.1.3 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACION TRANSICION LÍNEA MICROSTRIP-SLOTLINE CON STUBS RADIALES

En la presente sección se indica con mayor detalle el comportamiento que presenta la antena Vivaldi diseñada en la sección 2.2

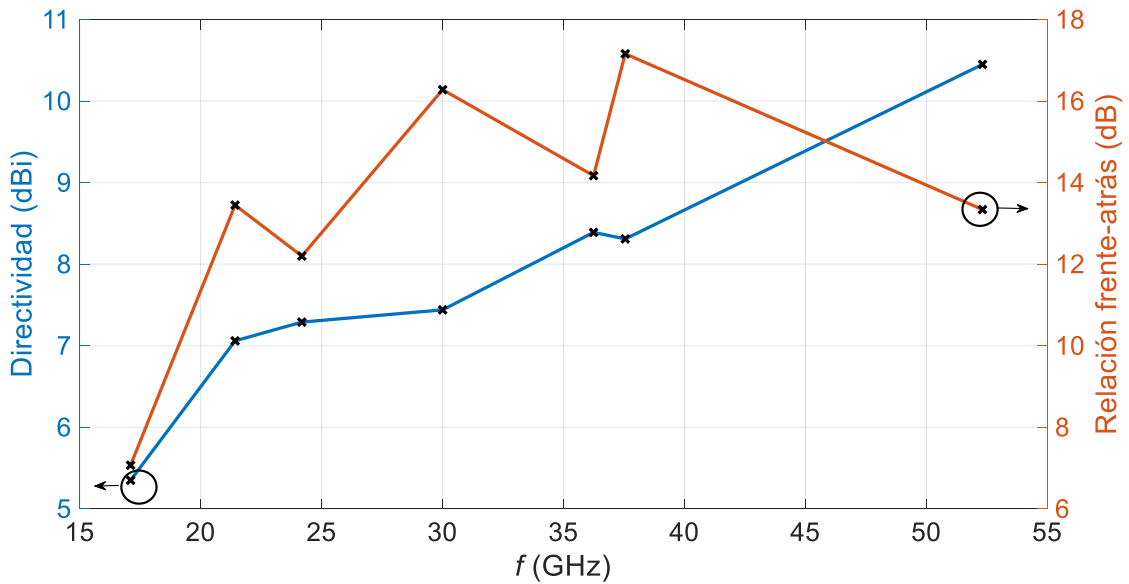
Al observar la Figura 2.24, la cual ilustra el parámetro de acoplamiento de la antena Vivaldi con alimentación *microstrip-slotline* con *stubs* radiales diseñada, se aprecia que el elemento radiante posee 3 *notches* de resonancia significativos dentro del ancho de banda que acapara la frecuencia de interés y dos *notches* de resonancia fuera de dicho ancho de banda.

En base a la Figura 2.25, la cual muestra el patrón de radiación tridimensional de la antena Vivaldi diseñada, la Figura 3.4 indica el patrón de radiación normalizado de cada una de las frecuencias en donde se encuentran los *notches* mencionados, así como también de las frecuencias de corte del ancho de banda que acapara a la frecuencia de 30 GHz. Es importante mencionar que el patrón de radiación normalizado es con corte en el ángulo  $\theta$  en  $90^\circ$ .



**Figura 3.4** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$  de las diferentes frecuencias de resonancia y de corte de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline slotline* con *stubs* radiales.

La Figura 3.5 ilustra la directividad y la relación frente atrás que presenta la antena en función de la frecuencia de operación.



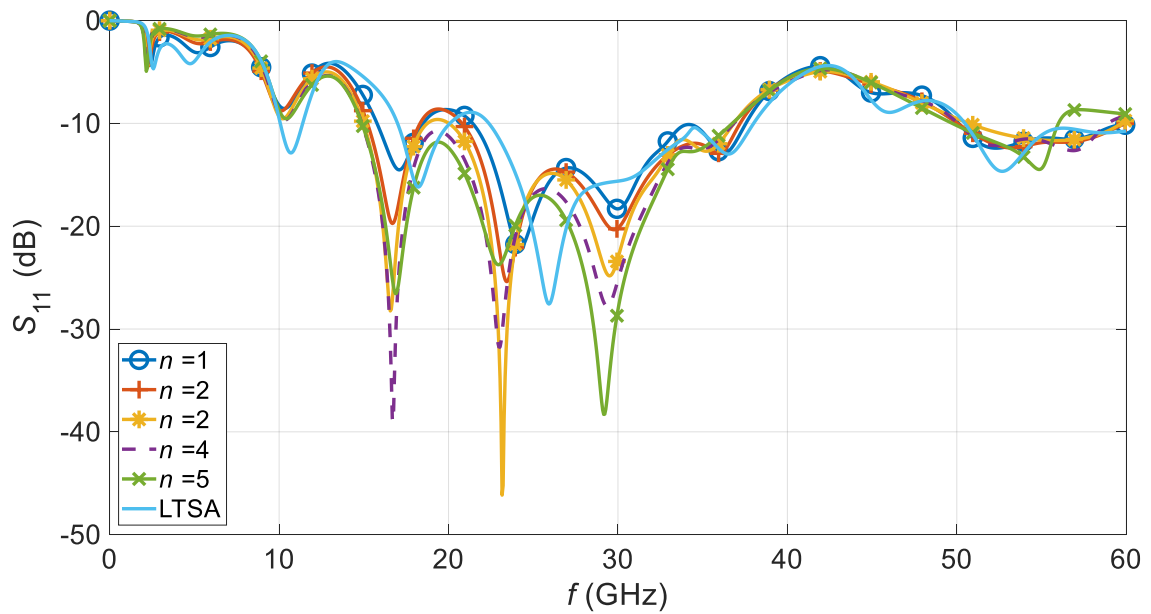
**Figura 3.5** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales en función de su frecuencia de operación.

La Figura 3.5 indica que el valor de directividad aumenta a medida que aumenta la frecuencia de operación de la antena. Además, se observa que no existe una relación clara entre la característica relación frente-atrás y la frecuencia de operación de la antena. Lo que se puede apreciar es que se tiene el mejor valor de esta característica a la frecuencia de 37,52 GHz, y a la frecuencia de 17,1 GHz se tiene el valor más bajo para la relación frente-atrás.

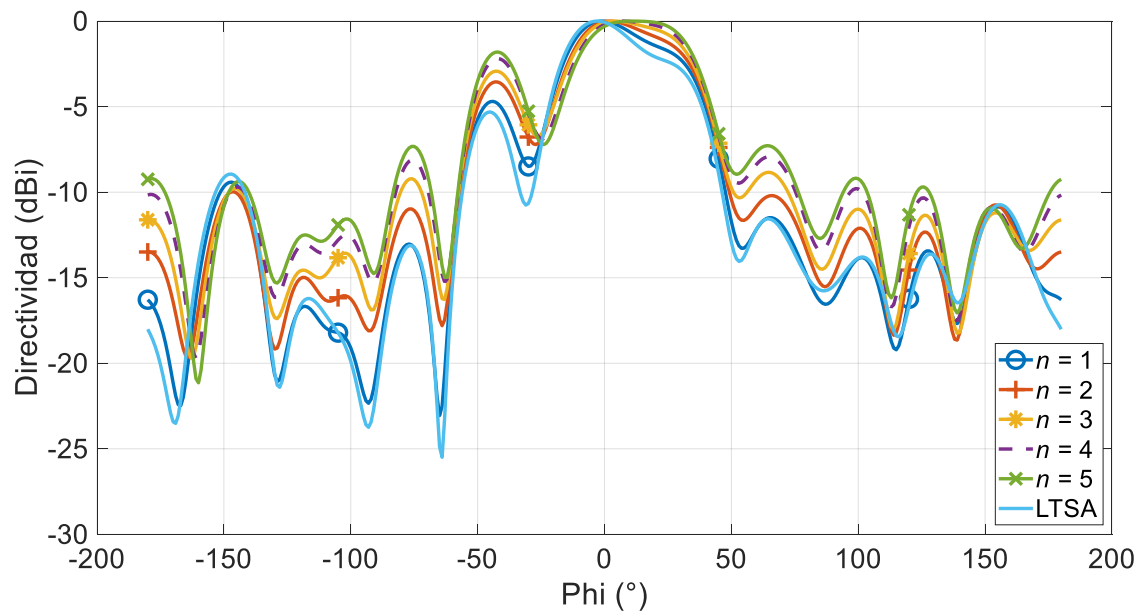
### 3.1.4 ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA

En la presente sección se muestra los resultados que se obtienen al implementar modificaciones en la curva que define la estructura de apertura del elemento radiante de la Figura 2.19 aplicando la ecuación (2.11)

La Figura 3.6 y Figura 3.7 muestra el comportamiento circuital y radiante del estudio realizado en la variación de la estructura de apertura de la antena con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales. El patrón de radiación normalizado hace referencia a la Figura 2.25.



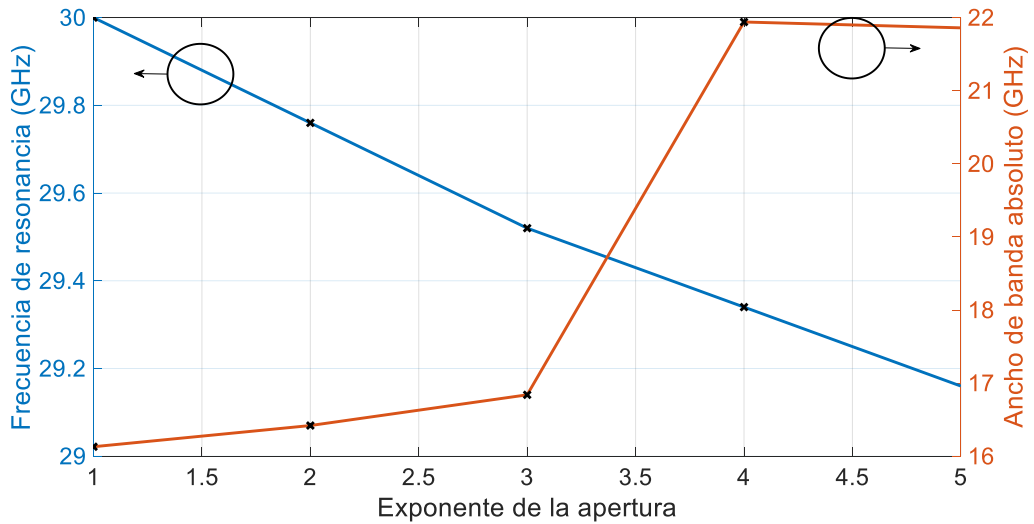
**Figura 3.6** Parámetro  $S_{11}$ . Variación de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales.



**Figura 3.7** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Variación de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales.

A continuación, se analizan las características circuitales y radiantes del estudio de la presente sección.

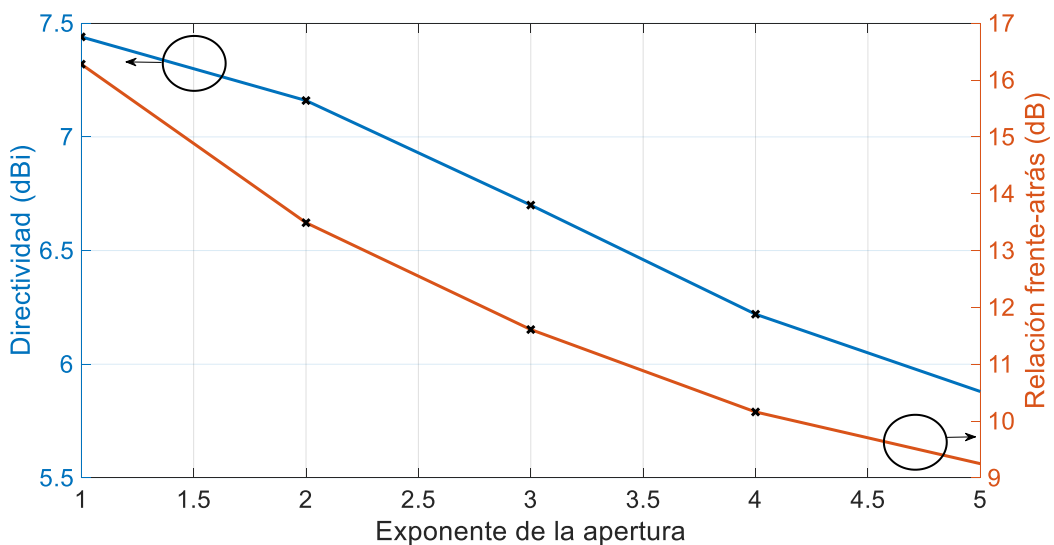
La Figura 3.8 ilustra la frecuencia de resonancia a la que operas la antena y el ancho de banda absoluto de la antena en función del exponente de la curva de apertura.



**Figura 3.8** Frecuencia de resonancia / Ancho de banda absoluto. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales en función del valor del exponente de la curvatura que defina la estructura de apertura.

La Figura 3.8 muestra que la frecuencia de resonancia menora a medida que aumenta el valor del exponente que define a la curva de apertura exponencial de la antena. Además, se observa que en general aumenta el ancho de banda de operación a medida que aumenta el valor del exponente que define a la curva de apertura exponencial de la antena.

La Figura 3.9 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que posee la antena en función del exponente de su curva de apertura.



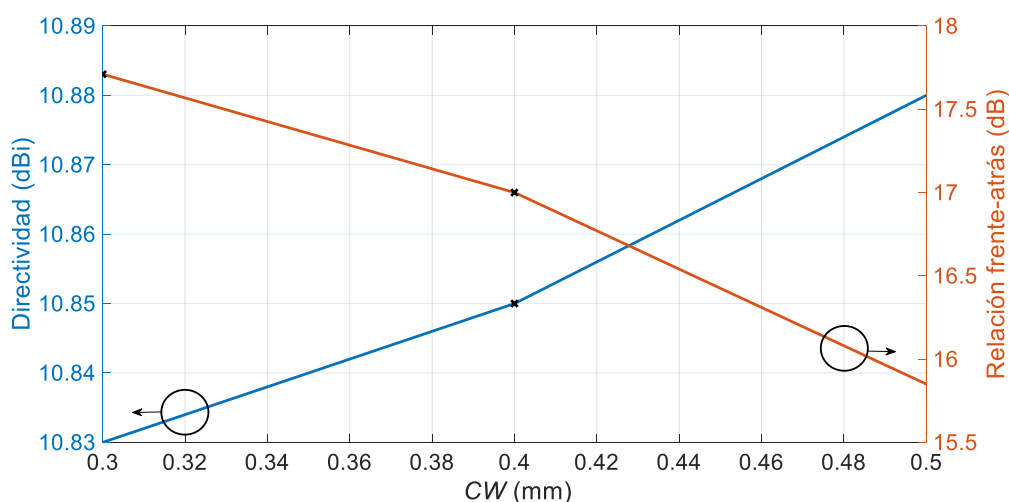
**Figura 3.9** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales en función del valor del exponente de la curvatura que defina la estructura de apertura.

En la Figura 3.9 se observa que disminuye tanto la directividad como la relación frente-atrás que presenta la antena a medida que aumenta el valor del exponente que define a la curva de apertura exponencial de la antena.

### 3.1.5 CORRUGACIONES EXTERNAS

Esta sección se refiere a los resultados del estudio de corrugaciones implementadas en la parte externa de la estructura radiante de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline*, la misma que se aprecia en la Figura 2.29.

La Figura 3.10 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en la parte externa del perfil de apertura en función del ancho de estas estructuras.

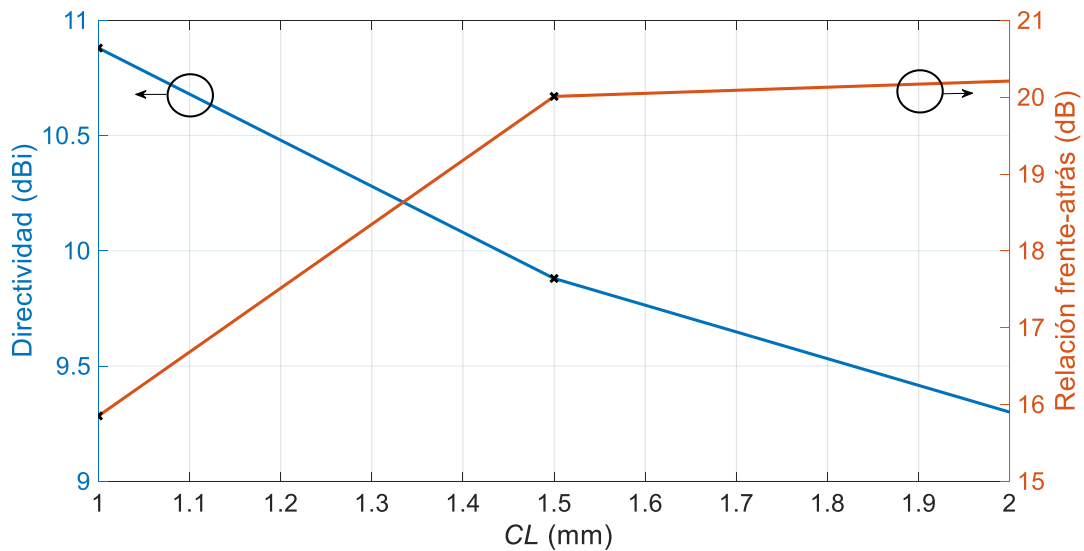


**Figura 3.10** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales e implementación de corrugaciones en la parte externa de la estructura de apertura en función del valor del ancho de las corrugaciones.

La Figura 3.10 indica que mejora la directividad a medida que el ancho de la corrugación sea mayor. Además, se observa que la relación frente-atrás disminuye a medida que el valor del ancho de la corrugación aumenta.

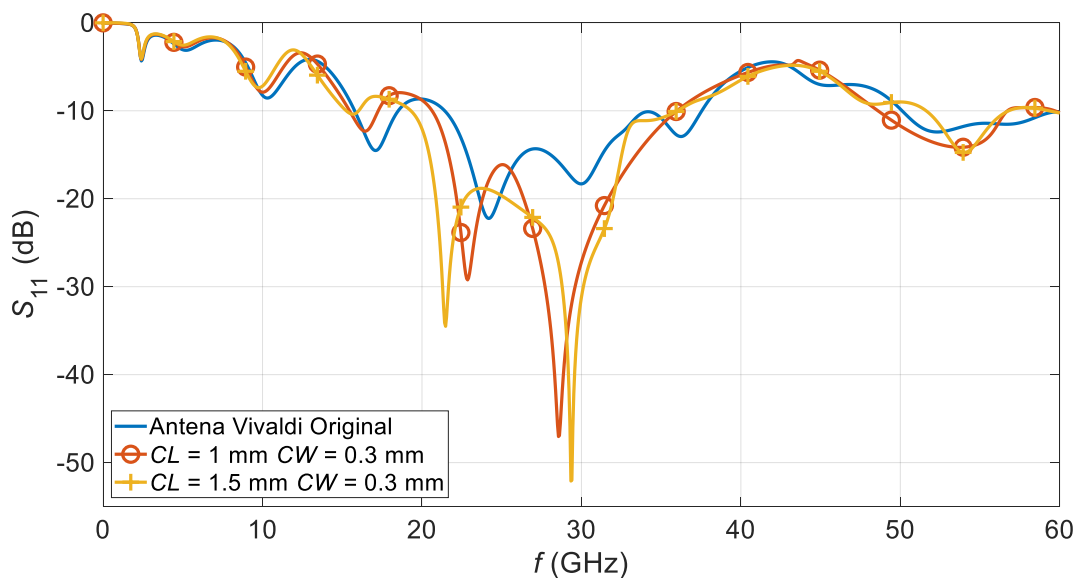
La Figura 3.11 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en la parte externa del perfil de apertura en función de la longitud de estas estructuras.

La Figura 3.11 indica que la directividad disminuye a medida que el largo de la corrugación aumenta. Además, se observa que aumenta la relación frente-atrás a medida que el largo de la corrugación incrementa.

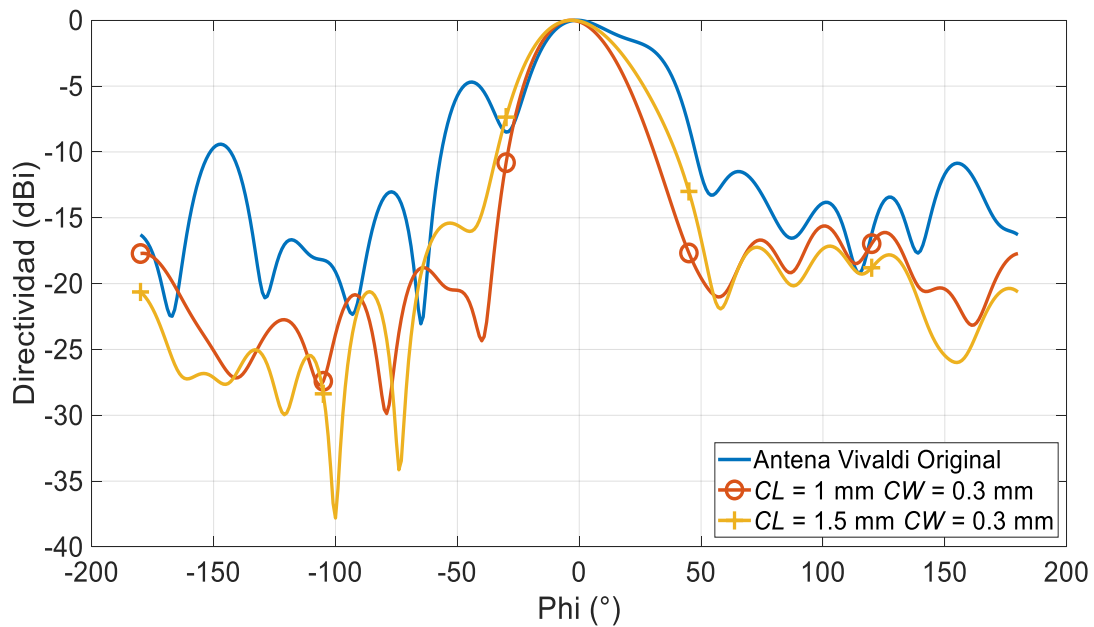


**Figura 3.11** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales e implementación de corrugaciones en la parte externa de la estructura de apertura en función del valor de la longitud de las corrugaciones.

En la Figura 3.12 y Figura 3.13 se presenta una comparación del comportamiento circuital y radiante entre la antenna original y la antenna con sus diferentes valores en las dimensiones de sus corrugaciones externas. Cabe mencionar que la Figura 3.13 indica el patrón de radiación normalizado en referencia a la Figura 2.25 y con corte en el ángulo  $\theta = 90^\circ$ .



**Figura 3.12.** Parámetro  $S_{11}$ . Comparación entre la antenna Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales original y la antenna implementada corrugaciones externas.



**Figura 3.13** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Comparación entre la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales original y la antena implementada corrugaciones externas.

La Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 detallan las características circuitales y radiantes que presenta la antena al implementarle los diferentes valores de las dimensiones en las corrugaciones externas.

**Tabla 3.1** Características circuitales de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales con corrugaciones externas.

Valor	Frecuencia (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
1	28,56	-47,03	20,63	36,00	15,37	54,28
2	29,34	-52,09	19,30	36,02	16,72	60,45

**Tabla 3.2** Características radiantes de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales con corrugaciones externas.

Valor	Directividad (dBi)	Relación frente-atrás (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Dirección lóbulo principal (°)	Anchura angular (°)	Nivel de lóbulo lateral (dB)
1	10,84	17,71	97,45	-3	33,7	-15,6
2	9,85	20,63	97,02	-3	40,8	-15,4

Al analizar la Tabla 3.2 se observa que:

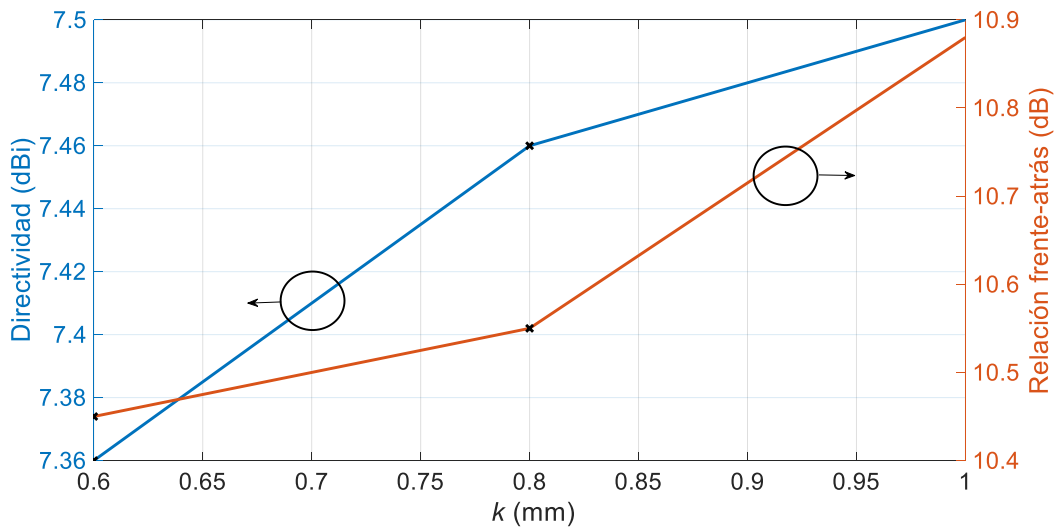
- Al aplicar corrugaciones cuyas dimensiones corresponde al valor 1 en la parte externa de la estructura de apertura, la directividad incrementa 3,4 dBi, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la directividad del 45,70%. Por otra parte, la relación frente atrás aumenta 1,43 dB, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la relación frente-atrás del 8,78%.
- Al aplicar corrugaciones cuyas dimensiones corresponde al valor 2 en la parte externa de la estructura de apertura, la directividad aumenta 2,41 dBi, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la directividad del 32,39%. Por otra parte, la relación frente atrás aumenta 4,35 dB, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la relación frente-atrás del 26,72%.

### 3.1.6 CORRUGACIONES INTERNAS

Esta sección se refiere a los resultados del estudio de corrugaciones implementadas en la parte interna de la estructura radiante de la antena Vivaldi, la misma antena se aprecia en la Figura 2.30

La Figura 3.14 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en el interior de su perfil exponencial en función de la periodicidad con la cual estas estructuras aparecen.

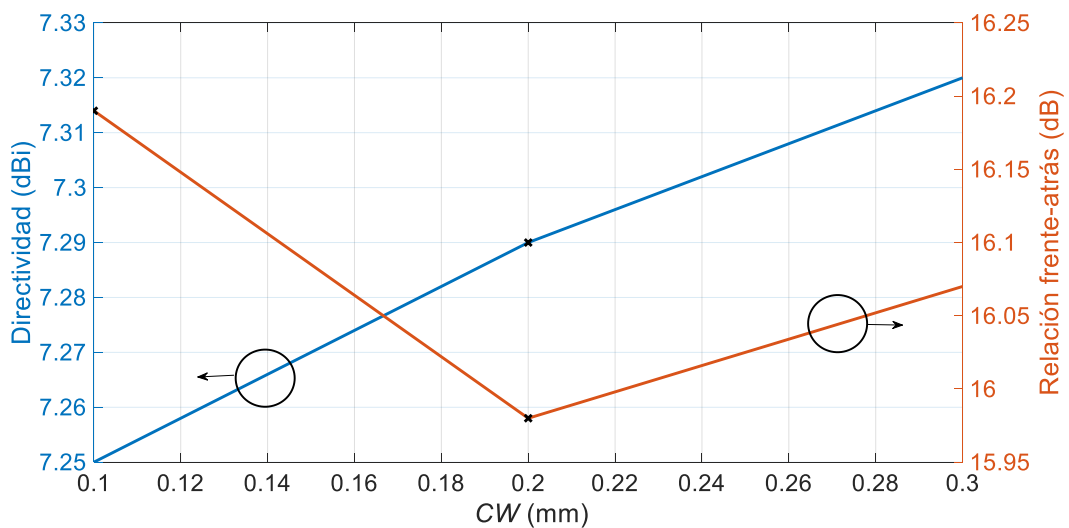




**Figura 3.14** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada en función del valor de la periodicidad de las corrugaciones.

En la Figura 3.14 se observa que la directividad y la relación frente-atrás aumentan a medida que la periodicidad entre cada estructura es mayor.

La Figura 3.15 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en el interior de su perfil exponencial en función del ancho de estas estructuras con una periodicidad entre cada corrugación igual a 1 mm.



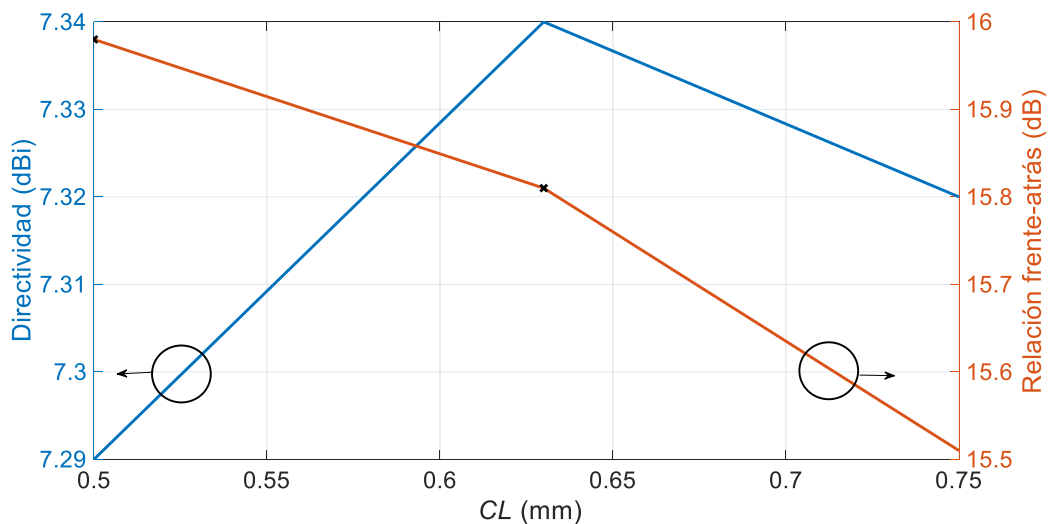
**Figura 3.15** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada en función del valor del ancho de las corrugaciones con periodicidad de 1 mm.

La Figura 3.15 indica que la directividad aumenta a medida que el ancho de la estructura es mayor. Además, se observa que para la relación frente-atrás no se tiene un comportamiento claro, pero se aprecia que cuando la estructura presenta un ancho de 0,2 mm la antena presenta el valor más bajo para esta característica radiante

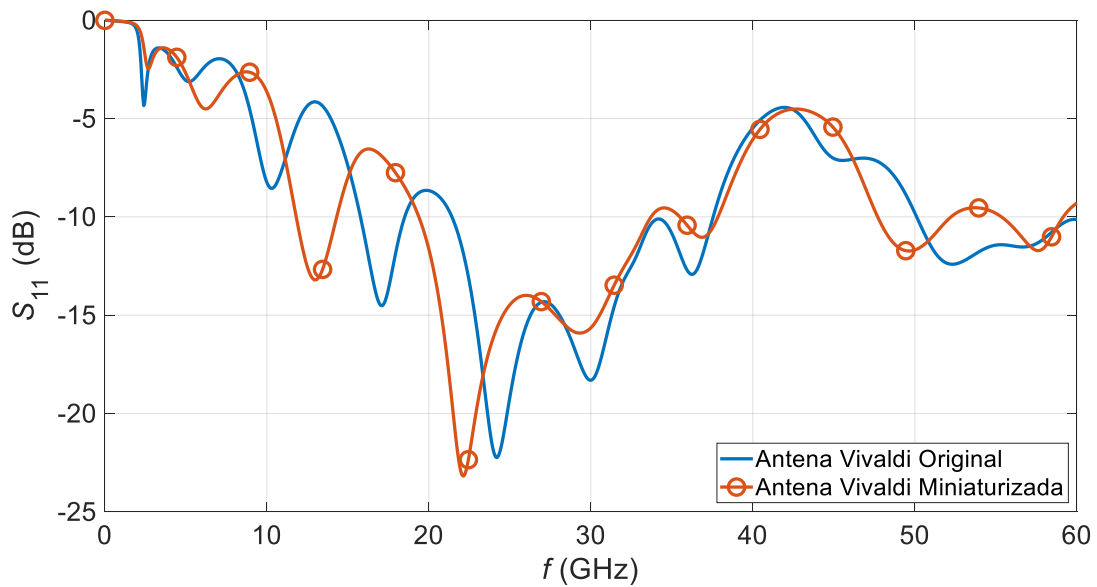
La Figura 3.16 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en el interior de su perfil exponencial en función de la longitud de estas estructuras con una periodicidad entre cada corrugación igual a 1 mm.

La Figura 3.16 indica que la antena presenta el mejor valor de directividad cuando el valor de la longitud de la corrugación es de 0,63 mm. Además, se observa que la relación frente-atrás disminuye a medida que la longitud de la estructura es mayor.

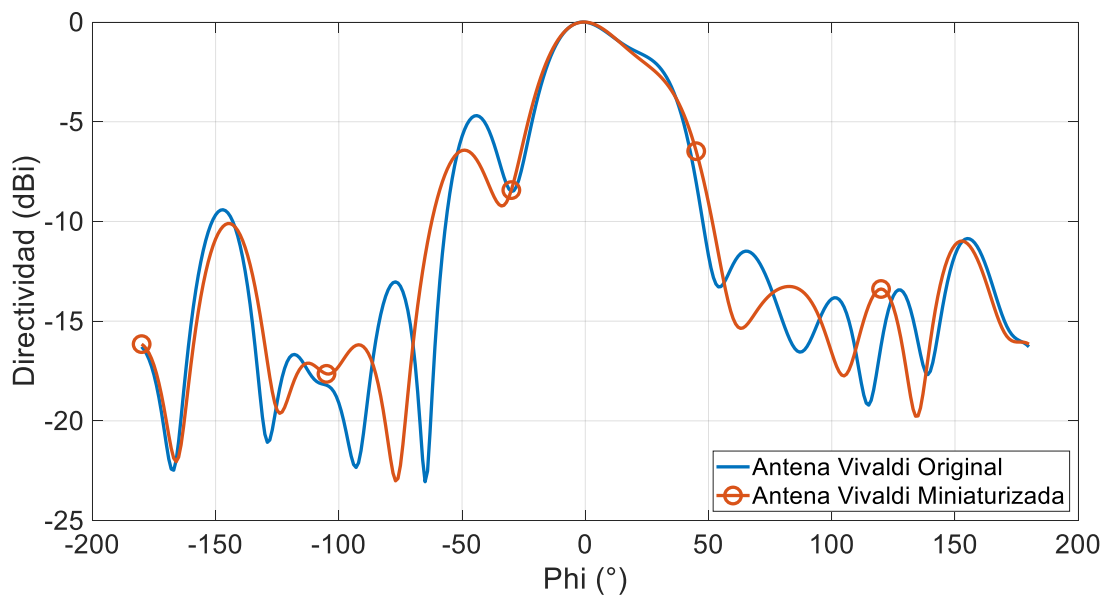
La Figura 3.17 y Figura 3.18 ilustra una comparación en término circuitales y de patrón de radiación entre la Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales original y miniaturizada. Cabe mencionar que la Figura 3.18 indica el patrón de radiación normalizado en referencia a la Figura 2.25 y con corte en el ángulo  $\theta = 90^\circ$ .



**Figura 3.16** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada en función del valor de la longitud de las corrugaciones con periodicidad de 1 mm.



**Figura 3.17** Parámetro  $S_{11}$ . Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales original y miniaturizada.



**Figura 3.18** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales original y miniaturizada.

En la Tabla 3.3 y Tabla 3.4 se detallan las características circuitales y radiantes que presenta la Antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada.

**Tabla 3.3.** Características circuitales de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada.

Frecuencia (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
29,40	-15,92	19,38	33,68	14,30	53,90

**Tabla 3.4** Características radiantes de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada.

Directividad (dBi)	Relación frente-atrás (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Dirección lóbulo principal (°)	Anchura angular (°)	Nivel de lóbulo lateral (dB)
7,32	16,07	97,35	-1	51,2	-6,4

Por medio de este estudio, se logra reducir la longitud de la estructura de apertura de 17,375 mm a 12,5 mm, con lo que se obtiene en términos porcentuales, una reducción del 28,06%.

Al analizar las características radiantes que presenta la antena Vivaldi con transición *microstrip-slotline* con *stubs* radiales miniaturizada, se observa que en la directividad existe una diferencia de 0,12 dBi que en términos de error porcentual representa un error del 1,61%. Mientras que en la característica de relación frente-atrás existe una diferencia de 0,22 dB que en términos de error porcentual representa un error del 1,29%.

## 3.2 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN ANTIPODAL

A continuación, se analizará los resultados obtenidos en las diferentes estructuras que conforman a la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

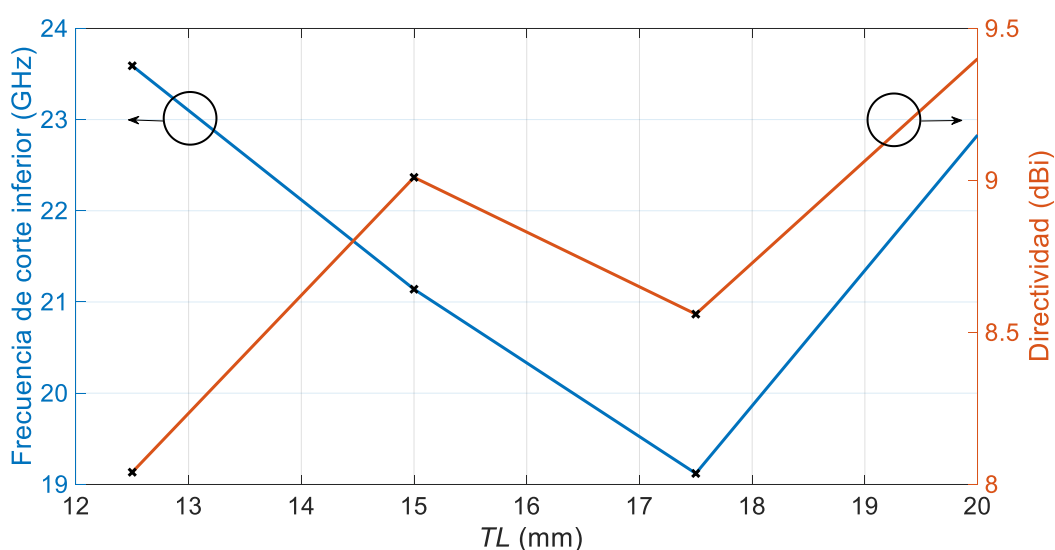
### 3.2.1 ESTRUCTURA DE APERTURA

En la presente sección se analiza los resultados circuitales y radiantes del estudio de las dimensiones de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal diseñada en la sección 2.3.

En primer lugar, se analiza los resultados de la variación de la longitud de la estructura de apertura ( $TL$ ) para la antena de la Figura 2.33.

En la Figura 3.19 se ilustra la frecuencia de corte inferior del ancho de banda absoluto y la directividad que presenta la antena en función del valor que posee la longitud en su estructura de apertura.

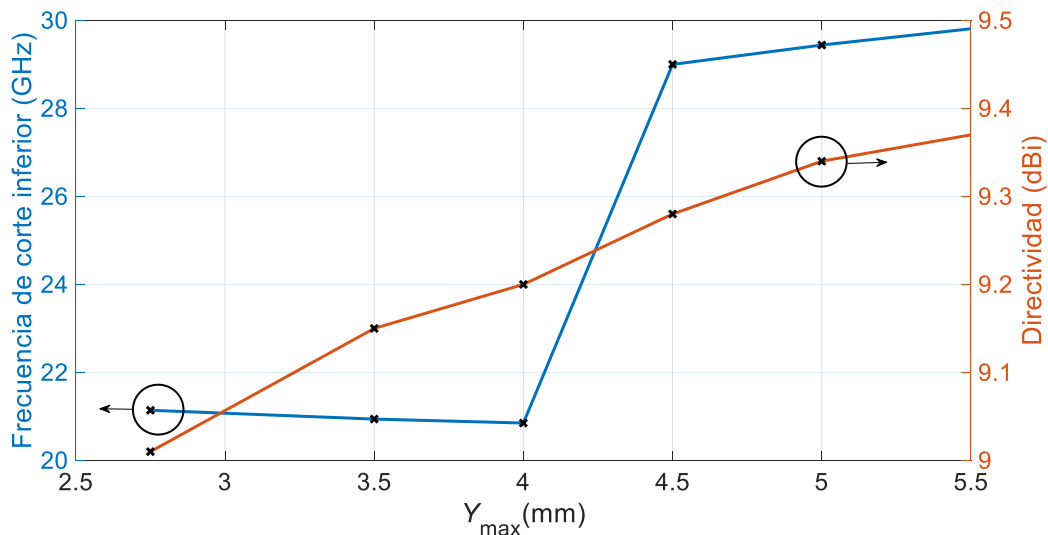
En la Figura 3.19 se aprecia que en primer lugar existe una tendencia decreciente de la frecuencia inferior de corte hasta el valor de 17,5 mm, a partir de dicho valor la frecuencia de corte inferior crece mientras mayor sea el valor para la longitud de la estructura de apertura. Además, se observa un comportamiento alterado de la directividad en función de la longitud de la apertura de la antena. Se aprecia que la antena presenta la mejor directividad cuando el valor del parámetro  $TL$  es de 20 mm, mientras que cuando este parámetro tiene el valor de 12,5 mm la antena presenta el menor valor directividad.



**Figura 3.19** Frecuencia de corte inferior / Directividad. Antena Vivaldi con alimentación antipodal en función de la longitud de la estructura de apertura.

En la presente sección también se analiza los resultados de la variación de la mitad de la anchura final de la estructura de apertura ( $Y_{\max}$ ) para la antena de la Figura 2.33.

En la Figura 3.20 se ilustra la frecuencia de corte inferior del ancho de banda absoluto y la directividad que presenta la antena en función del valor que posee el parámetro que representa a la mitad de la anchura final de la estructura de apertura.



**Figura 3.20** Frecuencia de corte inferior / Directividad. Antena Vivaldi con alimentación antipodal en función de la variación del parámetro que representa a la mitad de la anchura final de la apertura.

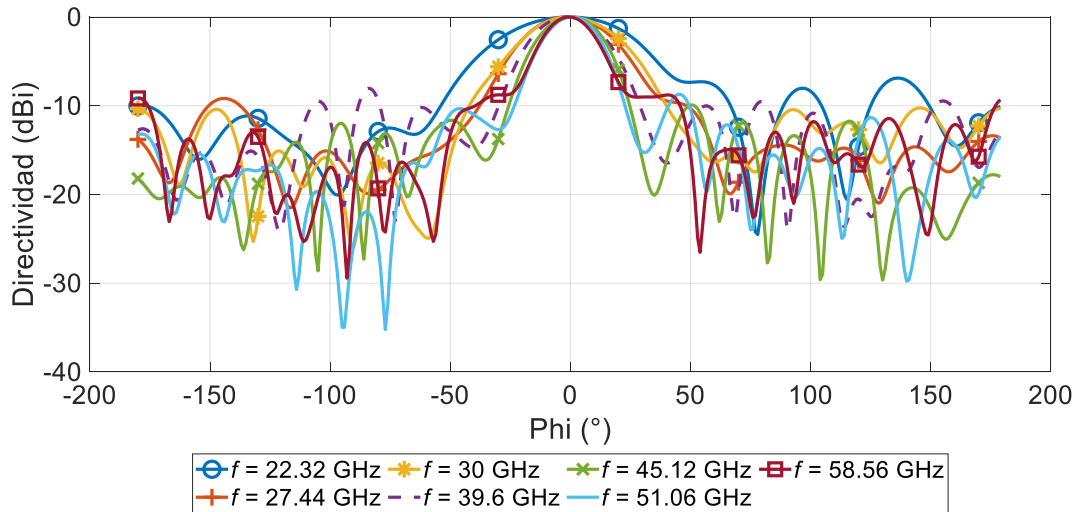
En la Figura 3.20 se observa que para la frecuencia de corte inferior, en primer lugar existe una ligera tendencia decreciente hasta cuando  $Y_{\max}$  toma el valor de 4 mm, a partir de dicho valor la frecuencia de corte inferior aumenta a medida que es directamente proporcional a la anchura final de la estructura de apertura de la antena. Además, se observa que la directividad que presenta la Vivaldi antipodal aumenta a medida que el valor del ancho final de la estructura de apertura de la antena es mayor.

### 3.2.2 ANTENA VIVALDI CON ALIMENTACIÓN ANTIPODAL

En la presente sección se indica con mayor detalle el comportamiento que presenta la antena Vivaldi antipodal diseñada en la sección 2.3.

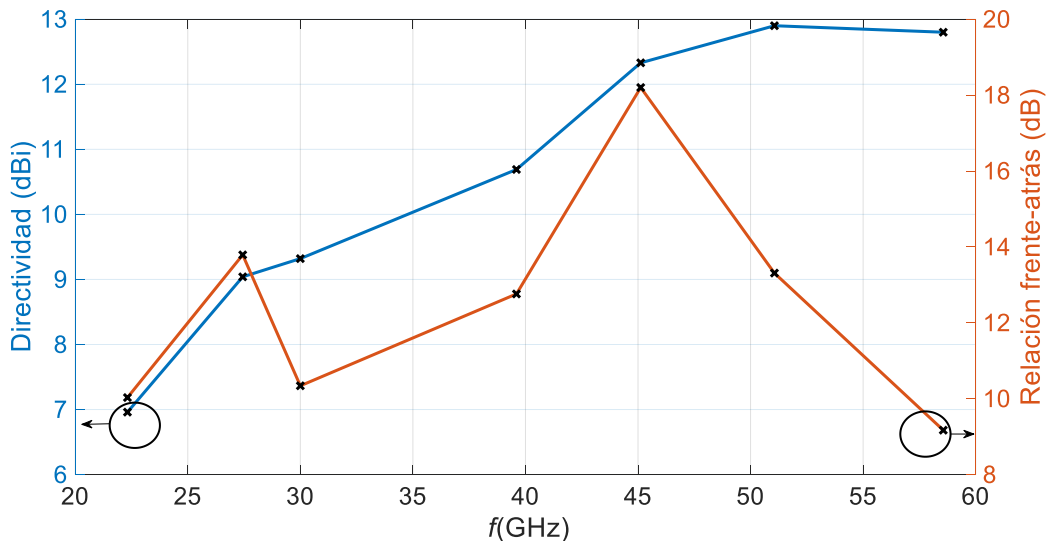
Al observar la Figura 2.37, la cual ilustra el acoplamiento que posee la antena Vivaldi con alimentación antipodal, se aprecia que el elemento radiante posee 5 *notches* de resonancia significativos dentro del ancho de banda que acapara la frecuencia de interés y un *notch* de resonancia fuera de dicho ancho de banda.

En base a la Figura 2.38, la cual muestra el patrón de radiación tridimensional de la antena Vivaldi antipodal diseñada; En la Figura 3.21 se observa el patrón de radiación normalizado de cada una de las frecuencias en donde se encuentran los *notches* mencionados, así como también de la frecuencia de corte inferior del ancho de banda que acapara a la frecuencia de 30 GHz. Es importante mencionar que el patrón de radiación normalizado es con corte en el ángulo  $\theta$  en  $90^\circ$ .



**Figura 3.21** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$  de las diferentes frecuencias de resonancia y de corte de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

La Figura 3.22 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena Vivaldi antipodal en función de la frecuencia de operación.



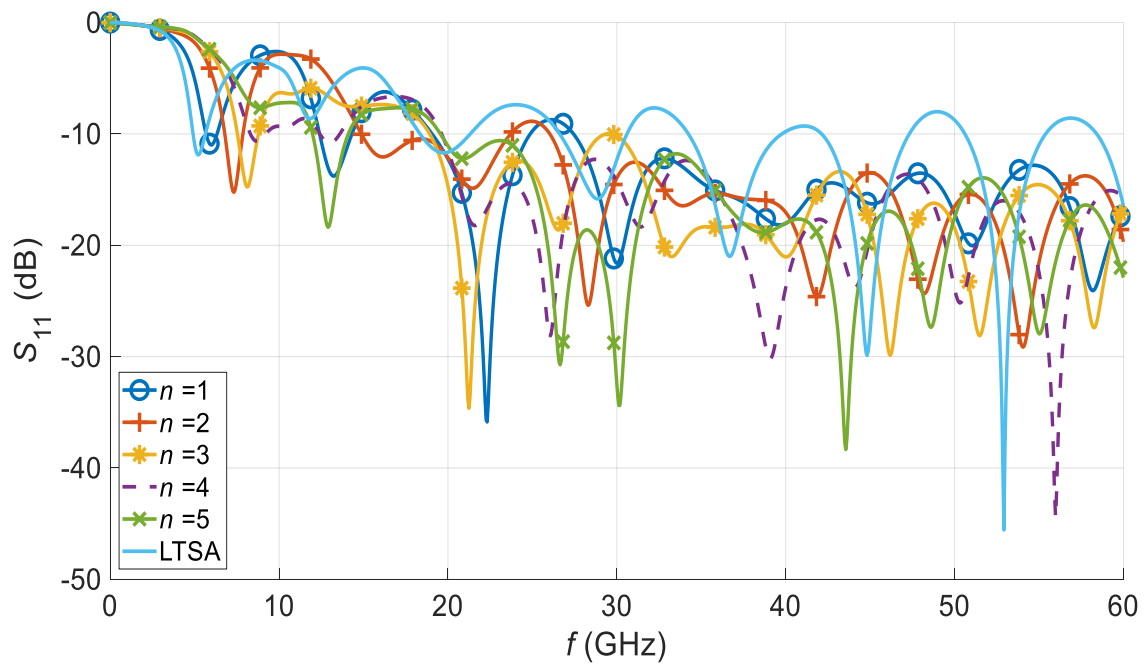
**Figura 3.22** Directividad de la antena Vivaldi con alimentación antipodal en función de su frecuencia de operación.

En la Figura 3.22 se aprecia que el valor de directividad aumenta a medida que aumenta la frecuencia de operación de la antena. Además, se observa que no existe una relación clara entre la relación frente-atrás y la frecuencia de operación de la antena. Se aprecia que se tiene el valor más alto de relación frente-atrás cuando la antena opera a la frecuencia de 45,12 GHz.

### 3.2.3 ESTUDIO DE FAMILIA DE CURVAS EN LA ESTRUCTURA DE APERTURA

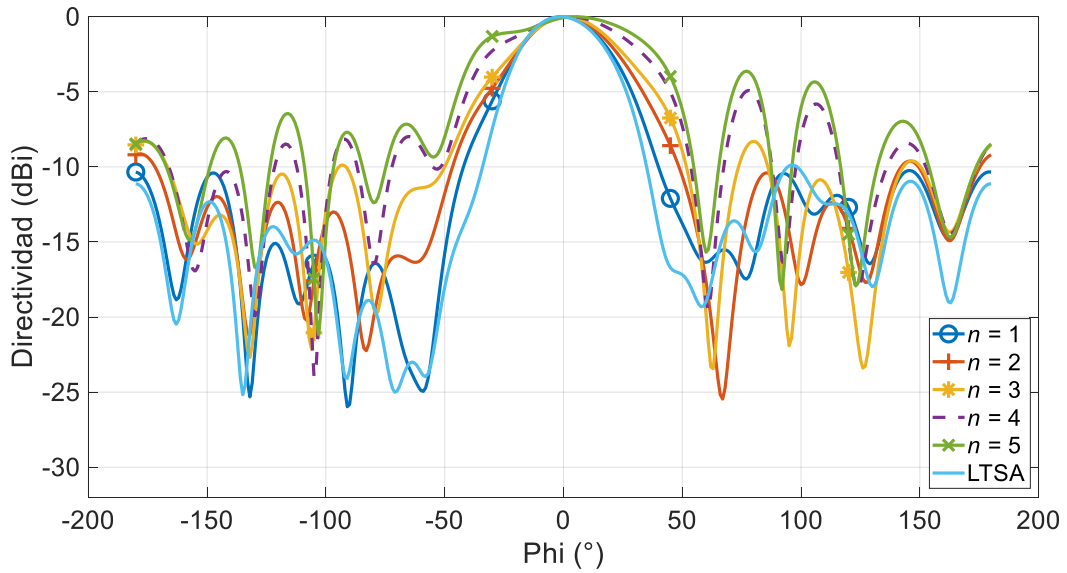
En la presente sección se muestra los resultados que se obtienen al implementar modificaciones en la curva que define la estructura de apertura del elemento radiante de la Figura 2.33 aplicando la ecuación (2.25).

En la Figura 3.23 y Figura 3.24 se presenta un resumen del comportamiento circuital y radiante del estudio realizado en la variación de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal. El patrón de radiación normalizado hace referencia a la Figura 2.38



**Figura 3.23** Parámetro  $S_{11}$ . Variación de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

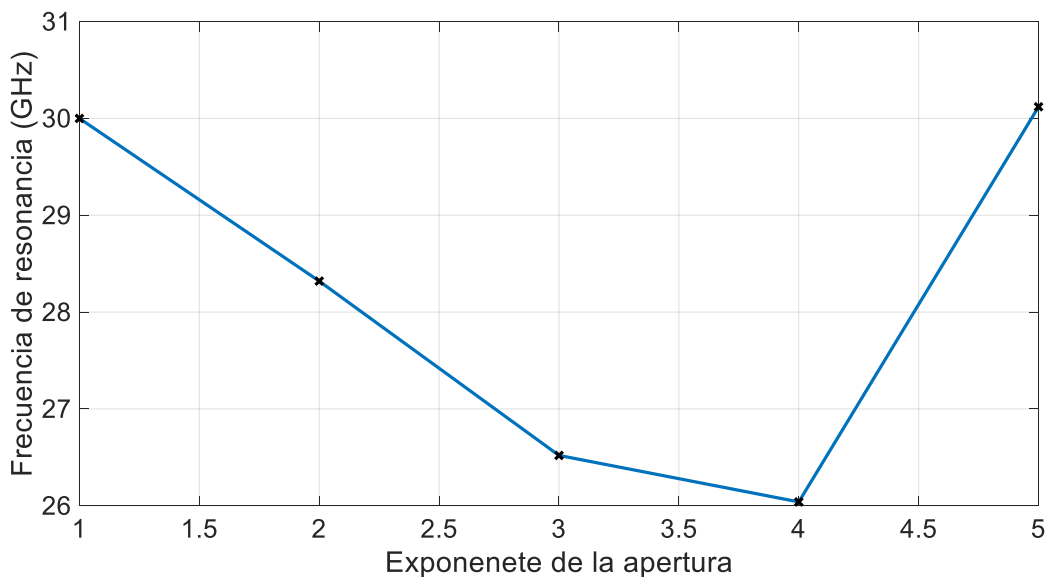




**Figura 3.24** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Variación de la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal.

A continuación, se analiza las características circuitales y radiantes del estudio de la presente sección.

La Figura 3.25 ilustra la frecuencia de resonancia a la que opera la antena en función del exponente de su curva de apertura.

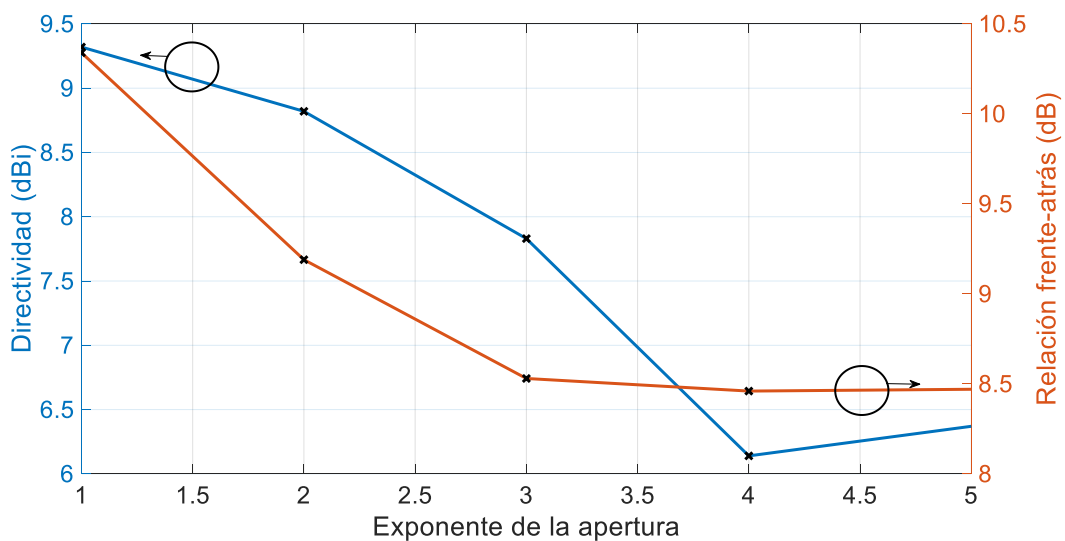


**Figura 3.25** Frecuencia de resonancia de la antena Vivaldi con alimentación antipodal en función del valor del exponente de la curvatura que defina la estructura de apertura.

En la Figura 3.25 se observa en un principio una tendencia decreciente de la frecuencia de resonancia en función del valor del exponente que define a la curva de apertura de la antena. A partir del valor  $n$  igual a 4 la frecuencia de resonancia crece. Se aprecia que se tiene la frecuencia de resonancia más alta cuando el exponente de la curvatura es 5.

La Figura 3.26 ilustra la directividad y la relación frente-atrás de la antena Vivaldi antipodal en función del exponente de su curva de apertura.

La Figura 3.26 indica que en general existe una tendencia decreciente del valor de la directividad de la antena a medida que el exponente de la curvatura crece. Además, se observa una tendencia decreciente del valor de la relación frente-atrás que presenta la antena a medida que el exponente de la curvatura es mayor hasta el valor de  $n$  igual a 3; a partir de ese valor la relación frente-atrás presenta un valor similar para los valores del exponente de la apertura de 4 y 5.



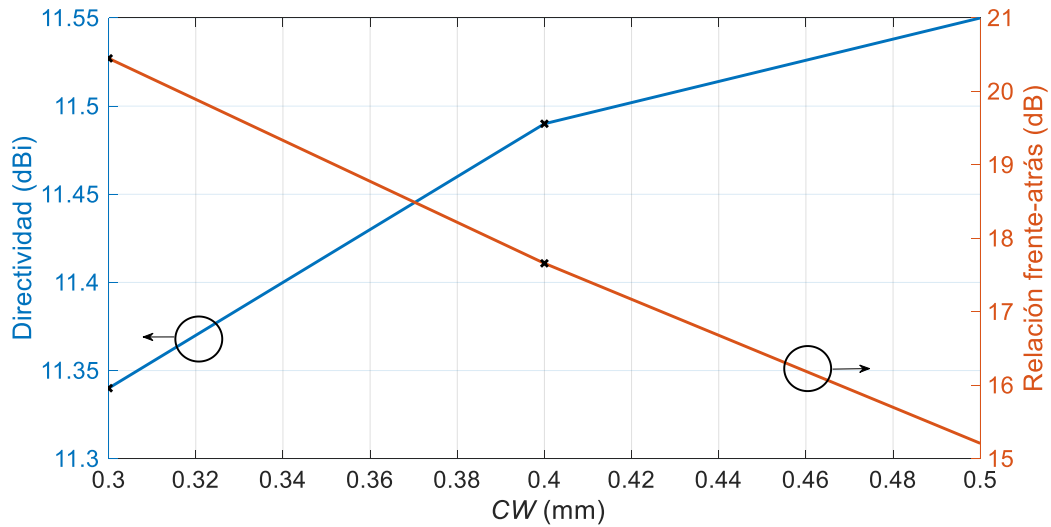
**Figura 3.26** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación antipodal en función del valor del exponente de la curvatura que defina la estructura de apertura.

### 3.2.4 CORRUGACIONES EXTERNAS

Esta sección se refiere a los resultados del estudio de corrugaciones implementadas en la parte externa de la estructura radiante de la antena Vivaldi con alimentación antipodal, la misma que se aprecia en la Figura 2.42

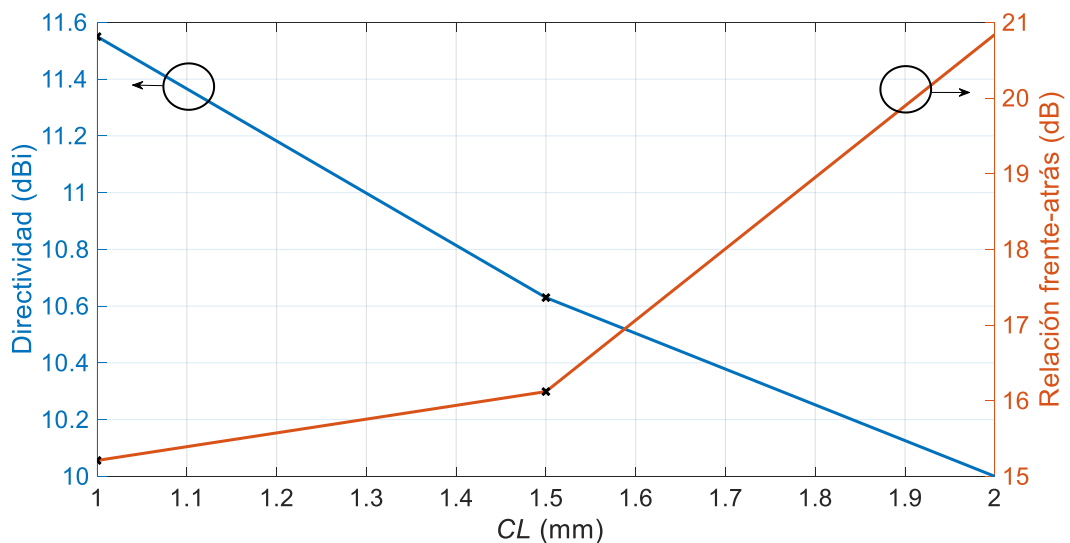
La Figura 3.27 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de las corrugaciones externas en función del ancho de estas estructuras.

La Figura 3.27 indica que mejora la directividad a medida que el ancho de la corrugación sea mayor. Además, se observa que el valor de la relación frente-atrás disminuye a medida que el ancho de la corrugación sea mayor.



**Figura 3.27** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación antipodal e implementación de corrugaciones en la parte externa de la estructura de apertura en función del valor del ancho de las corrugaciones.

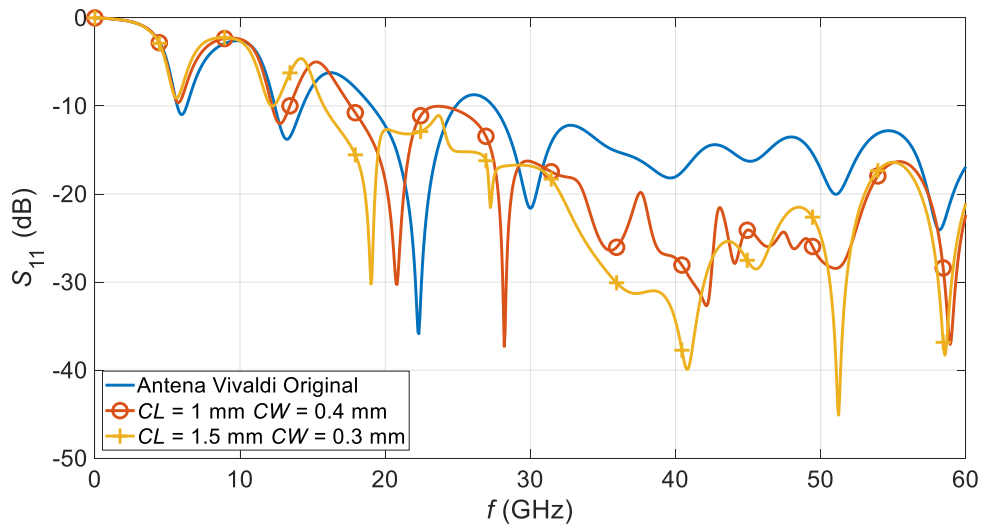
La Figura 3.28 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena Vivaldi antipodal con la implementación de las corrugaciones externas en función de la longitud de estas estructuras.



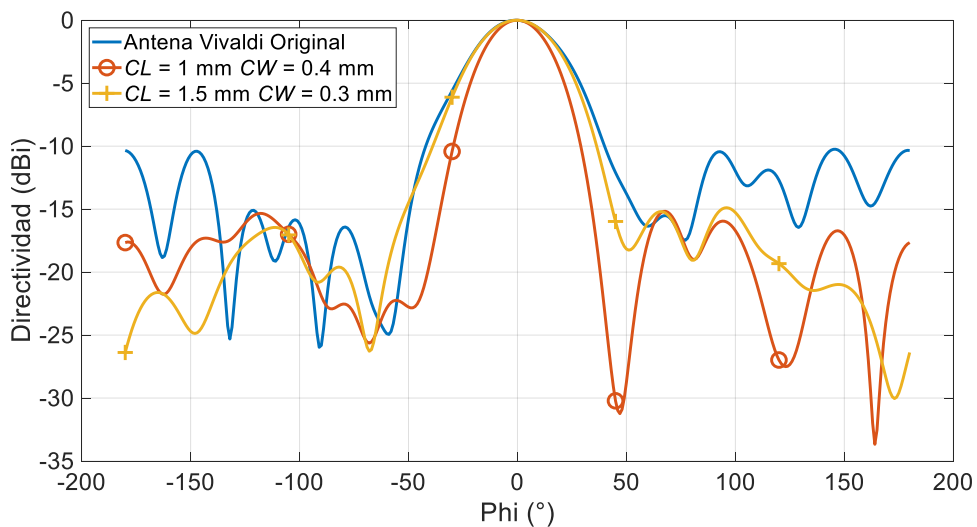
**Figura 3.28** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación antipodal e implementación de corrugaciones en la parte externa de la estructura de apertura en función del valor de la longitud de las corrugaciones.

La Figura 3.28 ilustra que el valor de la directividad disminuye a medida que la longitud de la corrugación sea mayor. Además, se observa que mejora la relación frente-atrás a medida que la longitud de la corrugación sea mayor.

En la Figura 3.29 y Figura 3.30 se presenta una comparación del comportamiento circuital y radiante entre la antenna original y la antenna con sus diferentes valores en las dimensiones de sus corrugaciones externas.



**Figura 3.29** Parámetro  $S_{11}$ . Comparación entre la antenna Vivaldi con alimentación antipodal original y la antenna implementada corrugaciones en la parte externa de su estructura de apertura.



**Figura 3.30** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Comparación entre la antenna Vivaldi con alimentación antipodal original y la antenna implementada corrugaciones en la parte externa de su estructura de apertura.

La Tabla 3.5 y Tabla 3.6 detallan las características circuitales y radiantes que presenta la antena al implementar los diferentes valores de las dimensiones en las corrugaciones externas.

**Tabla 3.5** Características circuitales de la antena Vivaldi con alimentación antipodal implementada corrugaciones en la parte externa de su estructura de apertura.

Valor	Frecuencia (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
1	28,02	-37,30	17,62	-	-	-
2	27,24	-21,54	15,78	-	-	-

**Tabla 3.6** Características radiantes de la antena Vivaldi con alimentación antipodal implementada corrugaciones en la parte externa de su estructura de apertura.

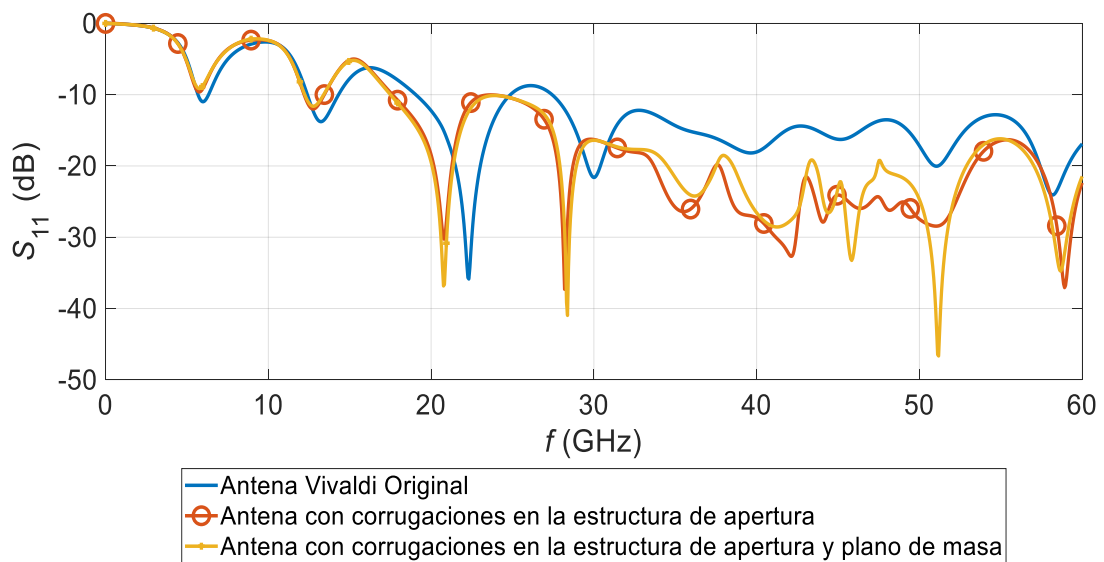
Valor	Directividad (dBi)	Relación frente-atrás (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Dirección lóbulo principal (°)	Anchura angular (°)	Nivel de lóbulo lateral (dB)
1	11,49	17,65	96,64	0	34,0	-15,2
2	10,59	26,38	96,42	0	42,6	-14,9

Al analizar la Tabla 3.6 se observa que:

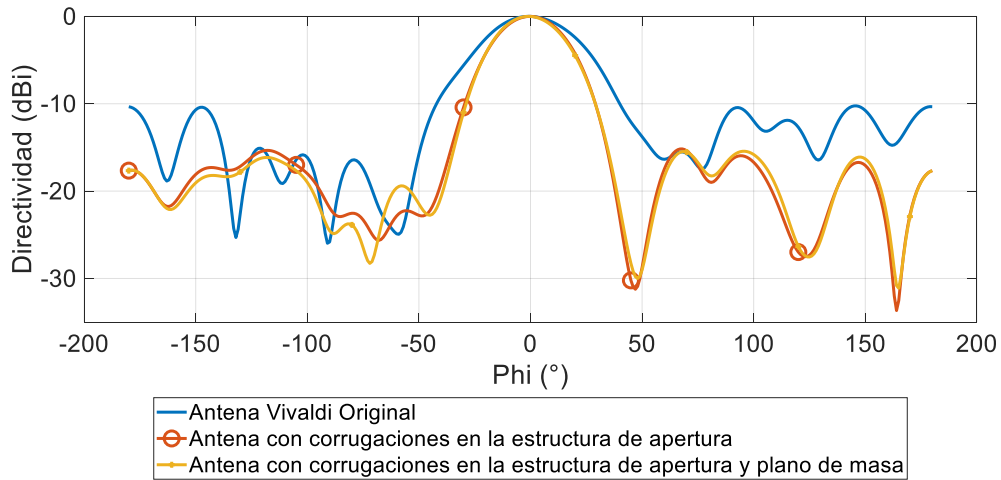
- Al aplicar corrugaciones cuyas dimensiones corresponde al valor 1 en la parte externa de la estructura de apertura, la directividad aumenta 2,17 dBi, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la directividad del 23,28%. Por otra parte, la relación frente atrás aumenta 7,31 dB, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la relación frente-atrás del 70,70%.
- Al aplicar corrugaciones cuyas dimensiones corresponde al valor 2 en la parte externa de la estructura de apertura, la directividad aumenta 1,27 dBi, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la directividad del 13,63%. Por otra parte, la relación frente atrás aumenta 16,04 dB, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la relación frente-atrás del 155,13%.

A continuación, se presenta el comportamiento circuital y radiante que tiene la antena al implementar corrugaciones en su perfil externo de la estructura de apertura y al implementar una corrugación en la mitad de su plano de masa (Figura 2.43), con los diferentes pares de valores en las dimensiones que componen a las corrugaciones.

En la Figura 3.31 y Figura 3.32 se presenta una comparación del comportamiento circuital y radiante entre la antena original, la antena implementada corrugaciones en su estructura de apertura y la antena implementada corrugaciones en su estructura de apertura y en su plano de masa. Las dimensiones de las corrugaciones corresponden al valor 1 ( $CL = 1$  mm,  $CW = 0,4$  mm)

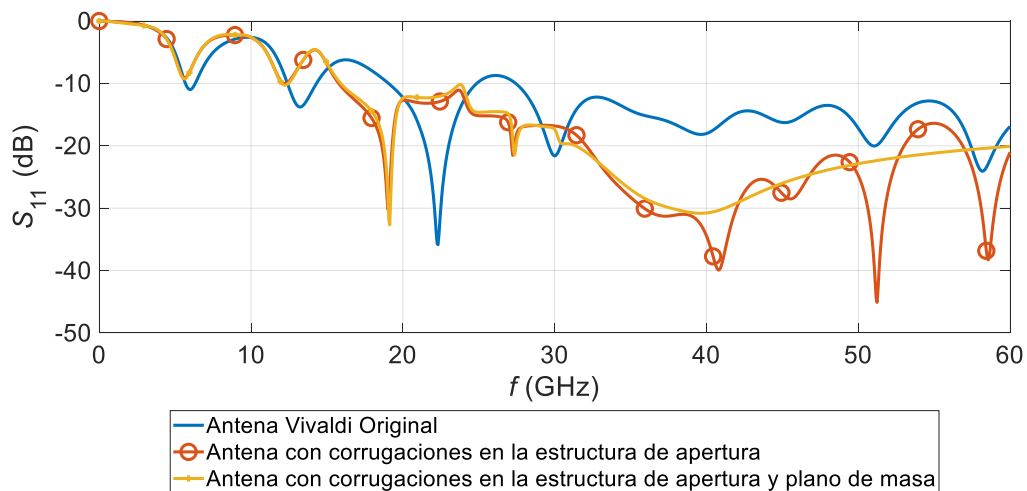


**Figura 3.31** Parámetro  $S_{11}$ . Comparación entre la antena Vivaldi con alimentación antipodal original, antena implementada corrugaciones externas en su estructura de apertura y antena implementada corrugaciones externas en su estructura de apertura y plano de masa.  $CL = 1$  mm  $CW = 0,4$  mm.

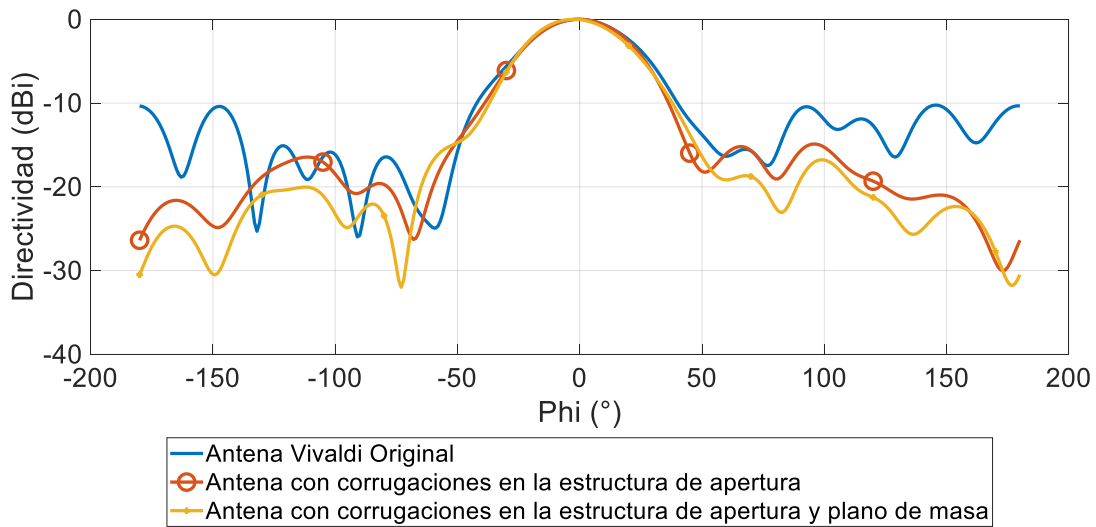


**Figura 3.32** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Comparación entre la antena Vivaldi con alimentación antipodal original, antena implementada corrugaciones externas en su estructura de apertura y antena implementada corrugaciones externas en su estructura de apertura y plano de masa.  $CL = 1 \text{ mm}$   $CW = 0,4 \text{ mm}$ .

En la Figura 3.33 y Figura 3.34 se presenta una comparación del comportamiento circuital y radiante entre la antena original, la antena implementada corrugaciones en su estructura de apertura y la antena implementada corrugaciones en su estructura de apertura y en su plano de masa. Las dimensiones de las corrugaciones corresponden al valor 2 ( $CL = 1,5 \text{ mm}$ ,  $CW = 0,3 \text{ mm}$ )



**Figura 3.33** Parámetro  $S_{11}$ . Comparación entre la antena Vivaldi con alimentación antipodal original, antena implementada corrugaciones externas en su estructura de apertura y antena implementada corrugaciones externas en su estructura de apertura y plano de masa.  $CL = 1,5 \text{ mm}$   $CW = 0,3 \text{ mm}$ .



**Figura 3.34** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Comparación entre la antena Vivaldi con alimentación antipodal original, antena implementada con corrugaciones externas en su estructura de apertura y antena implementada con corrugaciones externas en su estructura de apertura y plano de masa.  $CL = 1,5 \text{ mm}$   
 $CW = 0,3 \text{ mm}$ .

La Tabla 3.7 y Tabla 3.8 detallan las características circuitales y radiantes que presenta la antena al implementarle corrugaciones tanto en su estructura de apertura como en su plano de masa con los diferentes valores de las dimensiones en las corrugaciones externas.

Al analizar la Tabla 3.8 se observa que:

- Al aplicar corrugaciones cuyas dimensiones corresponde al valor 1 en la parte externa de la estructura de apertura y en el plano de masa, la directividad aumenta 2,35 dBi, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la directividad del 25,21%. Por otra parte, la relación frente atrás aumenta 7,32 dB, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la relación frente-atrás del 70,79%.
- Al aplicar corrugaciones cuyas dimensiones corresponde al valor 2 en la parte externa de la estructura de apertura y en el plano de masa, la directividad aumenta 1,53 dBi, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la directividad del 16,42%. Por otra parte, la relación frente atrás aumenta 20,15 dB, que al expresarlo en porcentaje, se obtiene una mejora en la relación frente-atrás del 194,86%.



**Tabla 3.7** Características circuitales de la antena Vivaldi con alimentación antipodal con corrugaciones externas en su estructura de apertura y en su plano de masa.

Valor	Frecuencia (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	AB absoluto (GHz)	AB relativo (%)
1	28,38	-40,97	17,50	-	-	-
2	27,36	-21,48	15,90	-	-	-

**Tabla 3.8** Características radiante de la antena Vivaldi con alimentación antipodal con corrugaciones externas en su estructura de apertura y en su plano de masa.

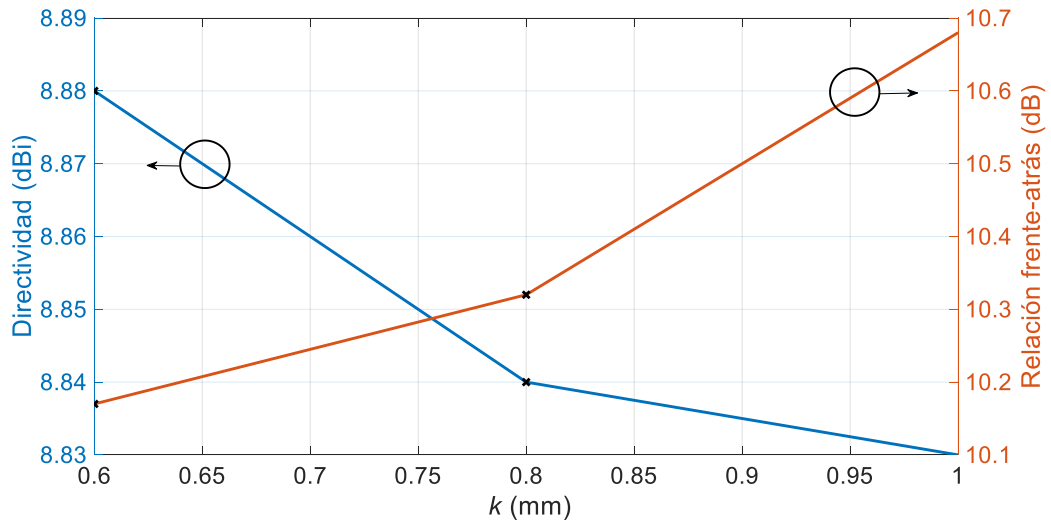
Valor	Directividad (dBi)	Relación frente-atrás (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Dirección lóbulo principal (°)	Anchura angular (°)	Nivel de lóbulo lateral (dB)
1	11,67	17,66	96,61	-1	33,6	-15,4
2	10,85	30,49	96,05	-3	41,5	-16,8

### 3.2.5 CORRUGACIONES INTERNAS

Esta sección se refiere a los resultados del estudio de corrugaciones implementadas en la parte interna de la estructura radiante de la antena Vivaldi con alimentación antipodal, la misma antena se aprecia en la Figura 2.44.

La Figura 3.35 ilustra la directividad y la relación frente atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en el interior de su perfil exponencial en función de la periodicidad con la cual estas estructuras aparecen.

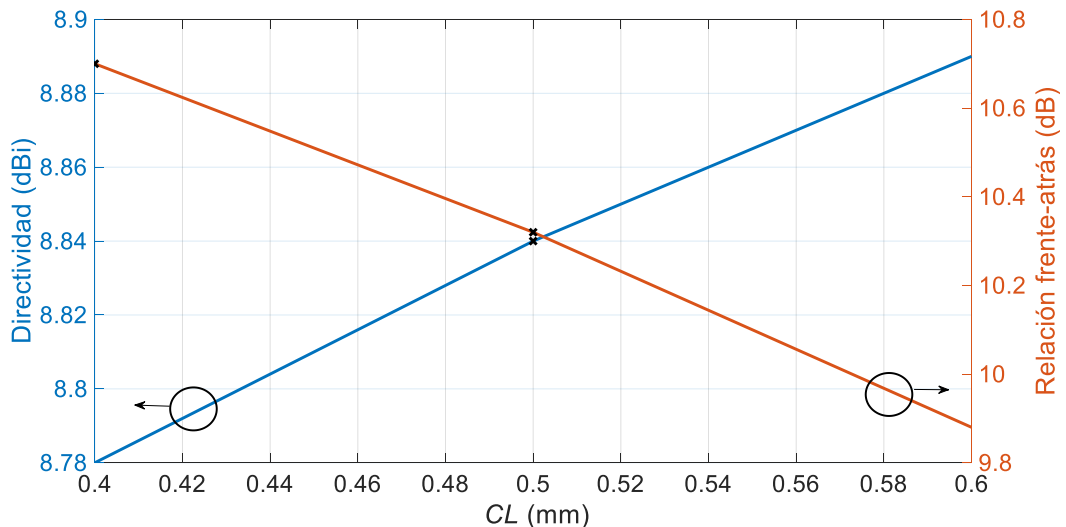
La Figura 3.35 indica que la directividad disminuye a medida que la periodicidad entre cada estructura es mayor. Además, se observa que la relación frente-atrás aumenta a medida que la periodicidad entre cada estructura es mayor.



**Figura 3.35** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada en función del valor de la periodicidad de las corrugaciones.

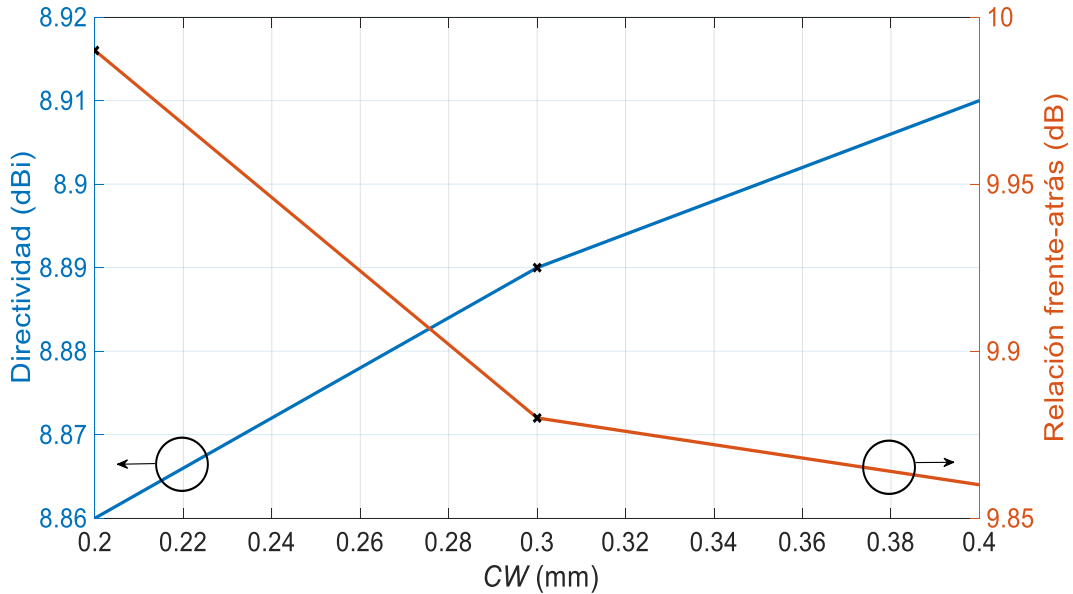
La Figura 3.36 ilustra la directividad y la relación frente atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en el interior de su perfil exponencial en función de la longitud de estas estructuras, con una periodicidad entre cada corrugación igual a 0,8 mm.

La Figura 3.36 indica que la directividad aumenta a medida que la longitud de la corrugación es mayor. Además, se observa la relación frente-atrás disminuye a medida que la longitud de la estructura aumenta.



**Figura 3.36** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada en función del valor de la longitud de las corrugaciones con periodicidad de 0,8 mm.

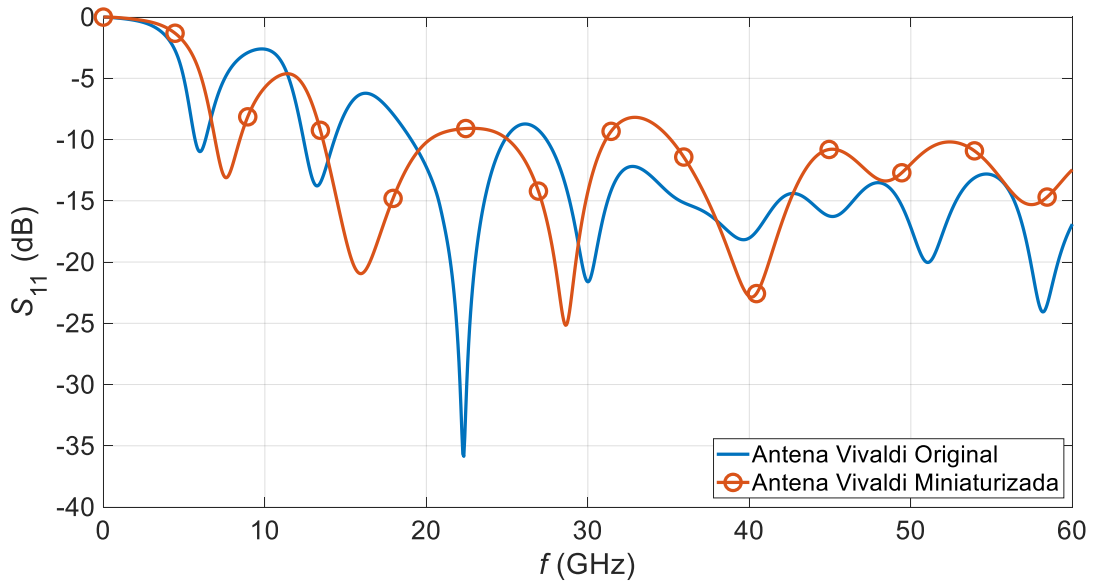
La Figura 3.37 ilustra la directividad y la relación frente-atrás que presenta la antena con la implementación de corrugaciones en el interior de su perfil exponencial en función del ancho de estas estructuras.



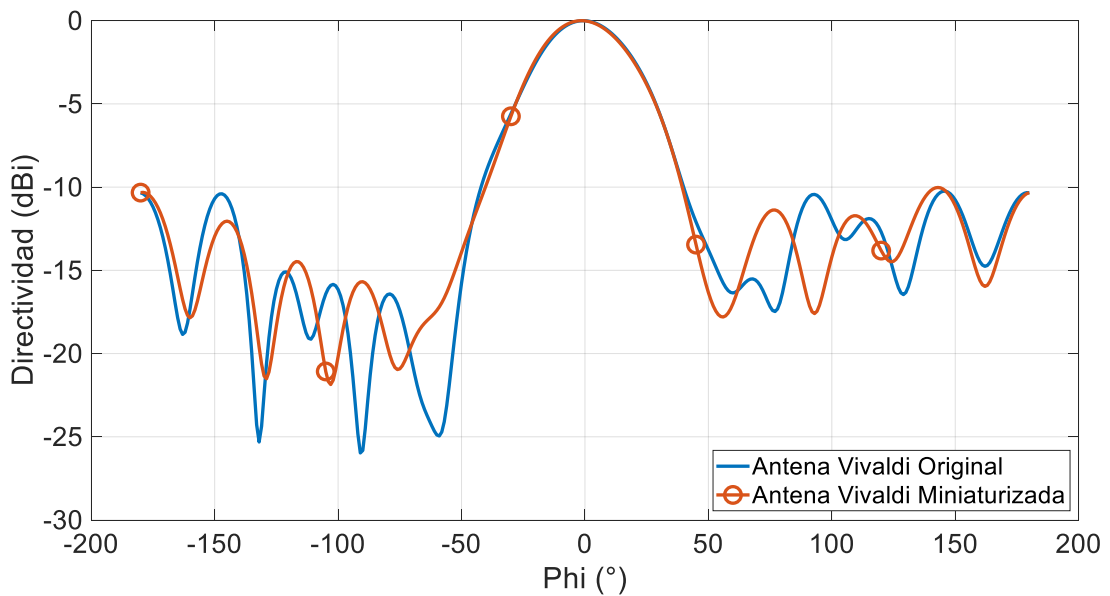
**Figura 3.37** Directividad / Relación frente-atrás. Antena Vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada en función del valor del ancho de las corrugaciones con periodicidad de 0,8 mm.

La Figura 3.37 indica que la directividad aumenta a medida que la anchura de la estructura es mayor. Además, se observa que la relación frente-atrás disminuye a medida que la anchura de la estructura aumenta.

La Figura 3.38 y Figura 3.39 ilustra una comparación en términos circuitales y de patrón de radiación entre la Antena Vivaldi con alimentación antipodal original y miniaturizada. La Figura 3.39 indica el patrón de radiación normalizado en referencia a la Figura 2.38 y con corte en el ángulo  $\theta = 90^\circ$ .



**Figura 3.38** Parámetro  $S_{11}$ . Antena Vivaldi con alimentación antipodal original y miniaturizada.



**Figura 3.39** Patrón de radiación normalizado con corte en  $\theta = 90^\circ$ . Antena Vivaldi con alimentación antipodal original y miniaturizada.

En la Tabla 3.9 y Tabla 3.10 se detallan las características circuitales y radiantes que presenta la antena Vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada.

**Tabla 3.9** Características circuitales de la antena Vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada.

<b>Frecuencia (GHz)</b>	<b>S<sub>11</sub> (dB)</b>	<b>Frecuencia inferior (GHz)</b>	<b>Frecuencia superior (GHz)</b>	<b>AB absoluto (GHz)</b>	<b>AB relativo (%)</b>
28,62	-25,16	25,04	31,11	6,07	21,62

**Tabla 3.10** Características radiantes de la antena Vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada.

<b>Directividad (dBi)</b>	<b>Relación frente-atrás (dB)</b>	<b>Eficiencia de radiación (%)</b>	<b>Dirección lóbulo principal (°)</b>	<b>Anchura angular (°)</b>	<b>Nivel de lóbulo lateral (dB)</b>
8,86	10,33	97,13	-1	44,3	-10

Por medio de este estudio, se logra reducir la longitud de la estructura de apertura de 16,825 mm a 12 mm, con lo que se obtiene en términos porcentuales una reducción del 28,68%.

Al analizar las características radiantes que presenta la antena vivaldi con alimentación antipodal miniaturizada, se observa que en la directividad existe una diferencia de 0,46 dBi que en términos de error porcentual representa un error del 4,94%. Mientras que en la característica de relación frente-atrás existe una diferencia de 0,01 dB que en términos de error porcentual representa un error del 0,1%.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

En el presente proyecto de titulación se ha realizado un estudio, por medio de simulaciones electromagnéticas en la herramienta CST Studio Suite, de diferentes estructuras de antenas para operación en ondas milimétricas basadas en las antenas del tipo TSA como premisa para futuras implementaciones en aplicaciones 5G.

En primer lugar, se ha contemplado realizar una breve descripción sobre la familia de antenas de banda ancha TSA, esta descripción ha incluido sus principios, características y los diferentes tipos de antenas. Asimismo, se ha descrito las diferentes técnicas que se utilizan tanto para su alimentación como para su miniaturización. Como resultado de la investigación, se ha presentado dos antenas del tipo Vivaldi diferenciadas en su estructura de alimentación. A cada una se ha realizado modificaciones en su estructura radiante las cuales incluye variación del perfil de apertura, implementación de corrugaciones rectangulares en la parte externa, con el fin de mejorar las características de radiación de la antena, y la implementación de corrugaciones rectangulares en la parte interna del perfil de apertura, con el fin de lograr la miniaturización de la antena.

La primera estructura de alimentación que se diseñó consiste en una doble transición *microstrip-slotline* con una terminación radial en sus *stubs* con el fin de aumentar el ancho de banda de operación. Dentro de esta estructura se ha realizado un estudio sobre la variación del ángulo que definen a los *stubs* radiales; como resultado de este estudio se ha evidenciado que existe una relación directamente proporcional entre el ángulo del *stub* y el ancho de banda de operación, además, existe una relación inversamente proporcional entre el ángulo del *stub* y el valor del parámetro de transmitancia; es decir, a medida que mayor sea el ángulo que define al *stub* radial, mayor será el ancho de banda operacional de la estructura pero a la vez la estructura presentará un menor coeficiente de transmisión.

Por otro lado, para la segunda estructura de alimentación se ha diseñado una estructura antipodal. Para esta estructura se ha realizado un estudio sobre el comportamiento que presenta la estructura en función de la longitud de la línea *microstrip*. Como resultado de este estudio se ha evidenciado, con la ayuda del parámetro de acoplamiento, que existe una relación inversamente proporcional entre la longitud de la línea *microstrip* y la frecuencia en donde se coloca el punto más bajo de resonancia, es decir que a medida que la longitud de la línea *microstrip* sea mayor, la frecuencia de resonancia de la estructura será menor. Así mismo con la ayuda del parámetro de transmitancia, se ha evidenciado que existe una relación inversamente proporcional entre la longitud de la línea *microstrip* y

el valor del factor de transmitancia, es decir que a medida que la longitud de la línea *microstrip* sea mayor, existirá mayores pérdidas de retorno.

En el estudio que se ha realizado para la determinación de las dimensiones de la estructura radiante, se ha determinado en ambas estructuras que existe una relación directamente proporcional entre el ancho final de la estructura de apertura y la directividad que presenta la antena, es decir que la antena presenta una mejor directividad a medida que la anchura final de su estructura de apertura es mayor.

Mediante la metodología presentada, se ha obtenido por medio de simulaciones electromagnéticas una antena del tipo Vivaldi alimentada mediante una estructura de transición *microstrip-slotline* que opera a 30 GHz; dicha antena posee un ancho de banda operacional de 16,13 GHz y un ancho de banda relativo de 54,7% con lo cual la antena es catalogada como elemento radiante de banda ancha. Mientras que, en sus características radiantes, ésta posee una directividad de 7,44 dBi, una relación frente-atrás de 16,28 dB y una eficiencia de radiación de 97,31%.

Así mismo, mediante la metodología presentada, se ha obtenido una antena tipo Vivaldi con alimentación antipodal que opera a 30 GHz. Dicha antena posee un ancho de banda operacional indeterminado, debido a su estructura de alimentación. Por dicha característica se puede definir a la estructura diseñada como antena de banda ancha. Adicionalmente esta antena presenta dentro de sus características radiantes una directividad de 9,32 dBi, una relación frente-atrás de 10,34 dB y una eficiencia de radiación 96,86%.

Con respecto a las características físicas de cada antena que se ha diseñado, se tiene que ambas estructuras presentan el mismo ancho cuyo valor es de 11,06 mm y la misma altura que corresponde a 0,288 mm. En lo que se diferencia una antena de la otra es en la longitud que cada una presenta; la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* presenta una longitud de 23,03 mm mientras que la antena Vivaldi con alimentación antipodal presenta una longitud de 22,85 mm.

Al comparar las antenas que se han diseñado en términos circuitales y radiantes, se observa que la antena que posee una estructura de alimentación antipodal presenta mejores características circuitales y una mejor directividad con respecto a la antena con alimentación transición *microstrip-slotline*.

Se observa que ambas antenas poseen una eficiencia de radiación alta, esto es debido a que con estructuras TSA, el campo eléctrico se propaga en su mayoría hacia el aire y muy poco se confina en el sustrato.

Al analizar el comportamiento circuital de cada antena, se observa que ambas antenas poseen frecuencias de resonancia adicionales a la de 30 GHz. Dentro de este análisis se obtiene que ambas antenas presentan una mejor directividad en las frecuencias de operación más altas.

En el estudio que se ha realizado con respecto a la modificación del perfil exponencial de la estructura radiante, se ha evidenciado que para ambas estructuras se tiene una relación inversamente proporcional tanto para la directividad como para la relación frente-atrás con respecto al incremento del exponente que define al perfil de apertura de las antenas; es decir que a medida que mayor sea el exponente que describe la apertura exponencial, las antenas presentarán a la frecuencia de 30 GHz un menor valor de directividad y de relación frente- atrás. Por otro lado, para la antena Vivaldi con transmisión *microstrip-slotline* se ha obtenido que la frecuencia de operación disminuye a medida que mayor sea el exponente de la estructura de apertura; adicionalmente el ancho de banda absoluto aumenta a medida que aumente el valor del exponente de la estructura radiante.

Adicional a la familia de curvas exponenciales que se ha creado, se ha definido una apertura lineal que representa una antena LTSA para ambos tipos de alimentación. Dicha antena presenta una directividad menor a la antena Vivaldi original, pero presenta una relación frente- atrás mejor con respecto a la misma. En términos radiantes la antena LTSA presenta un menor ancho de banda operacional y relativo con respecto a la antena Vivaldi diseñada. Estos resultados se observan para ambas antenas con sus respectivas estructuras de alimentación.

En el estudio que se ha realizado con respecto a la determinación de las dimensiones de las estructuras de corrugaciones que se han implementado en la parte externa de la estructura de apertura, se ha logrado establecer que existe una relación directamente proporcional entre el ancho de la corrugación y la directividad que presenta la antena implementada estas estructuras, por otro lado, existe una relación inversamente proporcional entre la relación frente-atrás que presenta la antena y el ancho de la corrugación. Así mismo se ha podido determinar que existe una relación inversamente proporcional entre la longitud de la corrugación y la directividad que presenta la antena, por su parte, existe una relación directamente proporcional entre la longitud de la corrugación y la relación frente-atrás que presenta la antena implementada estas estructuras.

Por medio de este estudio se ha logrado mejorar las características radiantes para ambas antenas Vivaldi; para la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* se ha logrado que su directividad mejore hasta en un 45,70%, mientras que para la relación



frente-atrás se ha logrado que exista una mejora de hasta el 26,72%. Mediante el mismo estudio, para la antena Vivaldi con alimentación antipodal, la presencia de estas estructuras ha ayudado a que su directividad mejore hasta un 25,21% y la relación frente-atrás de esta antena ha mejorado hasta un 194,86%.

En el estudio que se ha realizado con respecto a la determinación de las dimensiones de las estructuras de corrugaciones que se han implementado en la parte interna de la estructura de apertura, se ha logrado establecer que para la antena con alimentación transición *microstrip-slotline* existe un relación directamente proporcional entre el valor de la periodicidad con el cual cada estructura aparece y la directividad que presenta la estructura miniaturizada, por otro lado, en la antena con alimentación antipodal se ha evidenciado que existe una relación inversamente proporcional entre la periodicidad con que cada estructura aparece y la directividad que presenta la estructura miniaturizada. Para ambas antenas se ha determinado que a medida que el valor de periodicidad es mayor, aumenta la característica radiante de relación frente-atrás.

Al enfocarse en las dimensiones de las corrugaciones, se ha logrado determinar que mejora la directividad de la antena miniaturizada a medida que el ancho de la corrugación sea mayor; así mismo la relación frente atrás tiende a decrecer a medida que aumente el ancho de la corrugación. Por su parte en el estudio que involucra la longitud de la corrugación para este propósito se ha evidenciado que la directividad de la antena miniaturizada mejora a medida que la longitud de la corrugación es mayor, mientras que la relación frente-atrás tienen a menorar a medida que la longitud de la corrugación crece. Estos resultados se han obtenido para los dos tipos de antena Vivaldi.

Por medio de este estudio se ha logrado miniaturizar la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación transición *microstrip-slotline* en un porcentaje del 28,06%, obteniendo un error porcentual para la directividad del 1,61% y para la relación frente-atrás del 1,29%. Por su parte mediante el mismo proceso se ha logrado miniaturizar a la estructura de apertura de la antena Vivaldi con alimentación antipodal en un porcentaje del 28,68%, consiguiendo un error porcentual para la directividad del 4,94% y para la relación frente-atrás del 0,1%.

Los resultados que se han obtenido en el presente proyecto de titulación pueden utilizarse en un futuro para otros tipos de antenas de banda ancha, a las cuales se les requiera implementar corrugaciones ya sea para lograr mejorar sus características radiantes o lograr una miniaturización de la estructura. Así mismo, las diferentes estructuras de antenas

diseñada y simuladas en CST Studio Suite para su análisis dentro de este proyecto, sirven como premisa para una implementación.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

Mediante la experiencia que se ha adquirido con la simulación en CST Studio Suite de antenas TSA se recomienda dividir a la estructura en dos secciones, una correspondiente a la parte de alimentación y la otra correspondiente a la parte de radiación.

Es importante empezar con el diseño de la alimentación con el fin de asegurar las dimensiones de las componentes que conforman a estas estructuras; una vez diseñada esta sección, se integra la estructura radiante para su análisis. Así mismo se sugiere la investigación de diferentes tipos de alimentación (en línea, perpendiculares, etc) para antenas TSA, con el fin de determinar una estructura de alimentación óptima para esta familia de antenas.

Además, se recomienda utilizar planos de simetría en las estructuras que lo poseen con el fin de obtener un proceso de simulación más eficiente.

Se recomienda analizar y simular diferentes técnicas de miniaturización como por ejemplo corrugaciones elípticas, ondulaciones en forma de la función seno, configuraciones en forma de sol con ranuras rectangulares, etc.

Finalmente, se recomienda la selección de un sustrato que cumplan con las características apropiadas para antenas de banda ancha, ya que muchas de las dimensiones que posee las antenas Vivaldi dependen del valor de permitividad que presente este material. Así mismo elegir un sustrato que se encuentre disponible en el mercado nacional con el fin de una futura construcción de las antenas que se han diseñado.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [2] S. Zhu, H. Liu, Z. Chen, and P. Wen, "A compact gain-enhanced Vivaldi antenna array with suppressed mutual coupling for 5G mmWave application," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 776–779, 2018.
- [3] Z. Briqech, A.-R. Sebak, and T. A. Denidni, "Low-cost wideband mm-Wave phased array using the piezoelectric transducer for 5G applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6403–6412, 2017.
- [4] Y. Yao, X. Cheng, C. Wang, J. Yu, and X. Chen, "Wideband circularly polarized antipodal curvedly tapered slot antenna array for 5G applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 7, pp. 1539–1549, 2017.
- [5] B. Schoenlinner, X. Wu, J. P. Ebling, G. V. Eleftheriades, and G. M. Rebeiz, "Wide-scan spherical-lens antennas for automotive radars," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 50, no. 9, pp. 2166–2175, 2002.
- [6] Z. Briqech, J. Robitaille, K. Bishyk, K. Abdo, D. Bhogal, and A. Sebak, "High gain antipodal tapered slot antenna With sine-shaped corrugation and fermi profile substrate slotted cut-out for MMW 5G," in *Global Symposium on Millimeter-Waves (GSMM)*, 2015, pp. 1–3.
- [7] J. Hesselbarth, D. L. Cuenca, and H. B. Molina, "Millimeter-wave front-end integration concept using beam-switched lens antenna," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 1–5.
- [8] I. A. R. Mugueta, "Diseño y fabricación de una antena plana para cámaras de imagen en el rango del terahercio," *ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN, Pamplona*, 2010.
- [9] M. Janson, R. Salman, T. Schultze, I. Willms, T. Zwick, and W. Wiesbeck, "Hybrid ray tracing FDTD UWB-model for object recognition," *Frequenz*, vol. 63, no. 9–10, pp. 217–220, 2009.
- [10] W. Wiesbeck, G. Adamiuk, and C. Sturm, "Basic properties and design principles of UWB antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 372–385, 2009.
- [11] G. R. Aiello and G. D. Rogerson, "Ultra-wideband wireless systems," *IEEE microwave magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 36–47, 2003.

- [12] C. E. Baumann, L. Carin, and A. P. Stone, *Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics 3*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [13] L. E. Miller, "Why UWB? A review of ultrawideband technology," *National Institute of Standards and Technology, DARPA*, vol. 78, 2003.
- [14] K. S. Yngvesson, T. Korzeniowski, Y.-S. Kim, E. L. Kollberg, and J. F. Johansson, "The tapered slot antenna—a new integrated element for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, no. 2, pp. 365–374, 1989.
- [15] U. Kotthaus and B. Vowinkel, "Investigation of planar antennas for submillimeter receivers," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 37, no. 2, pp. 375–380, 1989.
- [16] R. Garg, I. Bahl, and M. Bozzi, *Microstrip lines and slotlines*. Artech house, 2013.
- [17] H. A. Wheeler, "Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 13, no. 2, pp. 172–185, 1965.
- [18] B. Shuppert, "Microstrip/slotline transitions: Modeling and experimental investigation," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 36, no. 8, pp. 1272–1282, 1988.
- [19] M. Zinieris, R. Sloan, and L. Davis, "A broadband microstrip-to-slot-line transition," *Microwave and optical technology letters*, vol. 18, no. 5, pp. 339–342, 1998.
- [20] L. L. Tovar Torres, "Diseño de una antena vivaldi antipodal modificada para aplicaciones GPR en la banda de 700 MHz-9 GHz."
- [21] O. F. Álvarez Herrera, "Análisis comparativo de diversas técnicas de miniaturización de antenas parche en la banda PCS (1, 9 GHz)."
- [22] A. M. Abbosh, "Miniaturized microstrip-fed tapered-slot antenna with ultrawideband performance," *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, vol. 8, pp. 690–692, 2009.
- [23] H. Liu, W. Yang, A. Zhang, S. Zhu, Z. Wang, and T. Huang, "A miniaturized gain-enhanced antipodal Vivaldi antenna and its array for 5G communication applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 76282–76288, 2018.
- [24] M. Moosazadeh, S. Kharkovsky, J. T. Case, and B. Samali, "Antipodal Vivaldi antenna with improved radiation characteristics for civil engineering applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 796–803, 2017.

- [25] S.-A. Malakooti, M. Moosazadeh, D. C. Ranasinghe, and C. Fumeaux, "Antipodal Vivaldi antenna for sum and difference radiation patterns with reduced grating lobes," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 3139–3142, 2017.
- [26] M. Moosazadeh, S. Kharkovsky, J. T. Case, and B. Samali, "Improved radiation characteristics of small antipodal Vivaldi antenna for microwave and millimeter-wave imaging applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1961–1964, 2017.
- [27] A. M. Montaluisa Montaluisa, "Diseño y construcción de una antena fractal monopolo alfombra de Sierpinski para la banda UHF. 151 hojs. Quito: EPN.," Quito, 2019., 2019.
- [28] R. Corporation, "RT/duroid® 5870 /5880High Frequency Laminates," 2017.
- [29] A. Abbosh, "Miniaturization of planar ultrawideband antenna via corrugation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 685–688, 2008.

## **ORDEN DE EMPASTADO**