

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**TECNOLOGÍAS PARA GUIADO DE ONDAS EN BANDAS
MILIMÉTRICAS UTILIZANDO ESTRUCTURAS PERIÓDICAS**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA GUÍA DE ONDA EN LA BANDA DE
MILIMÉTRICAS UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA RIDGE GAP WAVEGUIDE
(RGW)**

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

ANDRÉ ALEXANDER NARANJO CHACÓN

andre.naranjo@epn.edu.ec

LUIS FERNANDO CARRERA SUÁREZ

fernando.carrera@epn.edu.ec

DMQ, abril 2023

CERTIFICACIONES

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



André Alexander Naranjo Chacón

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ANDRÉ ALEXANDER NARANJO CHACÓN, bajo mi supervisión.



Luis Fernando Carrera Suárez, PhD.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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



ANDRÉ ALEXANDER NARANJO CHACÓN



LUIS FERNANDO CARRERA SUAREZ

DEDICATORIA

A quien me enseñó a soñar en grande y me apoyó
en cada paso del camino

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a las personas que me brindaron su apoyo durante la realización de esta tesis. En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Mónica y mi padre Edison por todo el amor incondicional, por haberme motivado a seguir adelante en los momentos de duda y por haberme enseñado los valores de perseverancia y dedicación, que me han llevado a culminar con éxito este proyecto.

Asimismo, a mi hermana Emily, quiero agradecerle por ser mi gran apoyo en todo momento, por brindarme su ánimo y por hacerme sentir acompañado en esta larga travesía.

Quiero agradecer a María José por haber sido mi compañía en las horas más complicadas y por ser una persona tan valiosa en mi vida. Tu apoyo y tus palabras de aliento fueron fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por estar siempre a mi lado.

Finalmente, quiero agradecer a mi tutor de tesis por haber sido un guía sabio y un mentor en mi formación como investigador. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para lograr los objetivos propuestos y para brindarme las herramientas necesarias para seguir creciendo como profesional.

A todos ellos, les agradezco de corazón por su ayuda y por haber sido parte importante en la culminación de este proyecto, que no solo representa un logro académico, sino también una muestra del apoyo y el amor que he recibido en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 MEDIOS DE GUIADO EN RF Y MICROONDAS	2
1.4.2 REVISIÓN BÁSICA DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN	7
1.4.3 ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA GAP WAVEGUIDE	10
2 METODOLOGÍA	21
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
3.1 Resultados	34
3.2 Conclusiones	38
3.3 Recomendaciones	39
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
5 ANEXOS	I

RESUMEN

La ingeniería de microondas ha avanzado significativamente en los últimos años, gracias a una serie de investigaciones enfocadas en el guiado de ondas, el desarrollo de nuevas tecnologías de transmisión, así como en el diseño de circuitos que permitan una mayor eficiencia del sistema de microondas. Si bien las guías de onda convencionales presentan ventajas como el manejo de altas potencias y bajas pérdidas, no es menos cierto que la exigencia en frecuencia limita su uso en nuevas aplicaciones. La implementación de líneas de transmisión planares no pudo satisfacer la exigencia de trabajar en bandas milimétricas por lo cual las “Ridge Gap Waveguides” se presentan como una de las soluciones a esta problemática, al implementar estructuras periódicas que generan la ausencia de contacto eléctrico entre las superficies metálicas que conforman la estructura.

Este documento recopila información sobre medios de transmisión en microondas y radiofrecuencia, y evalúa la tecnología Gap Waveguide, especialmente la guía Ridge, como una herramienta útil para la solución de problemas en esta área.

PALABRAS CLAVE: microondas, guías de onda, líneas de transmisión, ridge gap waveguides, bandas milimétricas, estructuras periódicas.

ABSTRACT

Microwave engineering has advanced significantly in recent years, thanks to a series of research focused on waveguiding, the development of new transmission technologies, as well as the design of circuits that allow for greater system efficiency. While conventional waveguides have advantages such as handling high powers and low losses, it is no less true that the frequency requirement limits its use in new applications. The implementation of planar transmission lines could not satisfy the requirement of working in millimeter bands, so “Ridge Gap Waveguides” are presented as one of the solutions to this problem, by implementing periodic structures that generate the absence of electrical contact between the metallic surfaces that make up the structure.

This document collects information on microwave and radiofrequency transmission media, and evaluates the Gap Waveguide technology, particularly the Ridge guide, as a useful tool for problem-solving in this area.

KEYWORDS: microwaves, waveguides, transmission lines, ridge gap waveguides, millimeter bands, periodic structures.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación se refiere a la tecnología Ridge Gap Waveguide (RGW), que son estructuras usadas para transmitir ondas electromagnéticas pensadas para trabajar en bandas de ondas milimétricas.

La tecnología de Ridge Gap Waveguide (RGW) ofrece una solución innovadora a los efectos causados por las altas frecuencias en líneas planares, que hasta el momento ha sido la opción más utilizada para este tipo de aplicaciones. Efectos negativos como la reflexión, dispersión y la atenuación, que pueden variar en función de la longitud y la geometría de la línea planar, así como de la frecuencia de la señal transmitida.

Las principales ventajas de esta tecnología son las bajas pérdidas, su bajo costo de producción y su facilidad de integrarse con otros componentes activos.

En este trabajo se revisan temas relacionados con la tecnología estudiada, y se presenta el diseño y modelamiento de una guía de onda tipo ridge gap para una frecuencia inicial de 35GHz. Sin embargo, debido a ciertas limitaciones que se explicarán más adelante en este trabajo, el diseño final de la guía presenta su funcionamiento en la banda X.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular una guía de onda tipo Ridge Gap en bandas milimétricas.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Estudiar los medios de guiado en radiofrecuencia y microondas que anteceden a la tecnología Ridge Gap Waveguide.
2. Diseñar la estructura de la guía de onda Ridge Gap Waveguide.

3. Implementar el diseño de la guía de onda en un software de simulación electromagnética 3D.
4. Optimizar la estructura de la guía para que tenga el comportamiento deseado.
5. Analizar la matriz de parámetros S de la guía de onda Ridge Gap Waveguide

1.3 ALCANCE

Este trabajo se centrará en un enfoque cuantitativo, el cual permitirá diseñar, simular y analizar una guía Ridge Gap Waveguide. Esto se logrará mediante la recopilación de información detallada acerca de las tecnologías de guiado, como la propagación de ondas electromagnéticas en guías de ondas y los efectos de la dispersión y reflexión. Asimismo, se realizarán simulaciones correspondientes a la tecnología RGW para verificar su funcionamiento. Esta información se utilizará para generar un análisis cuantitativo de la guía de onda tipo Ridge, permitiendo así una mejor comprensión de su funcionamiento.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 MEDIOS DE GUIADO EN RF Y MICROONDAS

Los medios de guiado también conocidos como medios de transmisión, son sistemas de conductores o semiconductores encargados de la transmisión de información de un lugar a otro en forma de ondas electromagnéticas. En radiofrecuencia, estos se utilizan en aplicaciones de comunicación, radar, telemetría, etc.

Estos medios de transmisión se pueden clasificar en función de su estructura física, como cables coaxiales, líneas de transmisión planares, guías de onda metálicas, entre otras.

1.4.1.1 Cable Coaxial

Nace en la década de 1930, como una alternativa para la transmisión a altas frecuencias en aplicaciones militares y telefonía, llegando a mantener alrededor de 1800 conexiones en simultáneo.

En la Figura 1.1 se observa que el cable coaxial está formado por dos conductores concéntricos separados por un dieléctrico que brinda estabilidad física al cable. Este dieléctrico es el elemento que introduce pérdidas por conducción, siendo así enfoque de estudios e investigaciones para reducir estos efectos negativos. En la actualidad, el dieléctrico se construye con polietileno y aire, logrando permitividades cercanas 1.3.

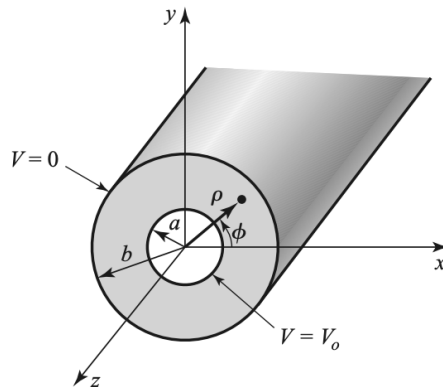


Figura 1.1: Geometría cable coaxial [1]

La impedancia característica del cable depende del espacio existente entre los dos conductores. Esta es su mayor desventaja, puesto que existen cables ya prefabricados para cierta impedancia, haciendo que los diseños usen obligatoriamente una impedancia estandarizada. Caso contrario, la fabricación de una línea con una impedancia específica es costosa.

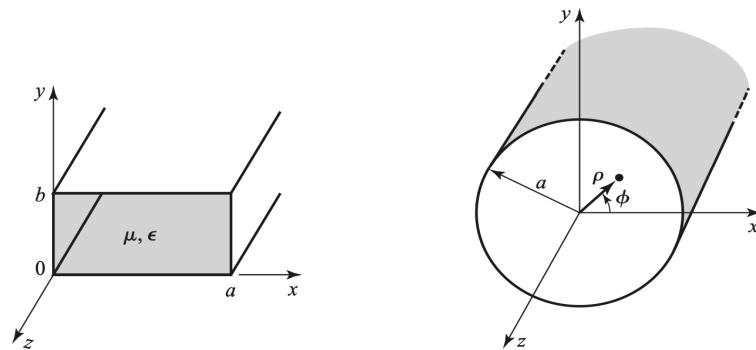


Figura 1.2: Cable Coaxial Comercial [2]

Si bien el cable coaxial es robusto frente a interferencias, el conductor externo atenúa señales electromagnéticas al actuar como conductor metálico conectado a tierra. Por esta razón, su atenuación presenta un comportamiento log-normal que hace que este medio sea incapaz de transportar señales de microondas a grandes distancias.

1.4.1.2 Guías de onda metálicas

Entre las guías de onda metálicas más conocidas están las guías rectangulares y circulares, usadas en componentes de microondas como acopladores, detectores o atenuadores que trabajan en la banda de 1 a 220GHz. Este tipo de guías poseen la ventaja de trabajar con sistemas de alta potencia, aplicaciones con ondas milimétricas y poseen pocas pérdidas.



(a) Geometría guía de onda rectangular (b) Geometría guía de onda circular

Figura 1.3: Guías de onda metálicas [1]

Los modos TE y TM son los únicos presentes en este tipo de guías de onda ya que están compuestas por un solo conductor. Debido a esta misma razón, el modo TEM no puede propagarse.

Si bien el uso de guías de onda metálicas brinda ventajas como la eliminación de pérdidas por radiación o buen manejo de potencia, las técnicas de fabricación se ven afectadas por las dimensiones que cada vez deben ser más pequeñas debido a frecuencias que van en el orden de las decenas de GHz.

Actualmente, existen varias técnicas alternativas para la fabricación de estos componentes, como por ejemplo el micro-mecanizado, que brinda precisión y es de bajo coste. Sin embargo, las aplicaciones cada vez requieren trabajar en frecuencias de las centenas de GHz, causando que su implementación sea casi imposible debido a las dimensiones tan pequeñas a las que deben ser fabricadas.

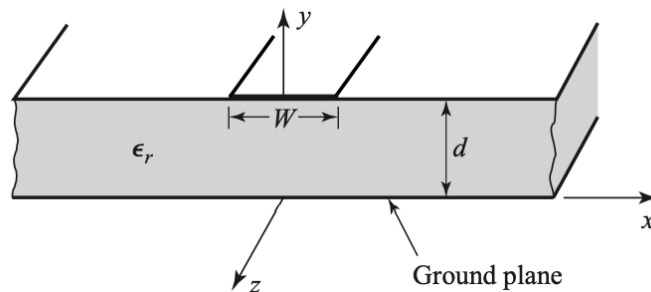
1.4.1.3 Líneas de transmisión planares

Las líneas de transmisión planares son estructuras que se utilizan para transmitir señales eléctricas con mínima pérdida y distorsión. Se denominan planares debido a que los ele-

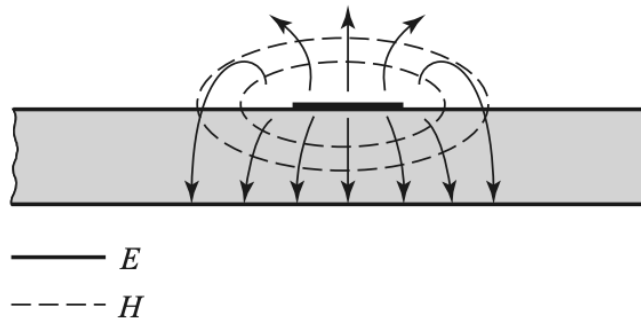
mentos conductores que componen la línea de transmisión suelen estar ubicados en una superficie plana.

Hay varios tipos de líneas de transmisión planares, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Los tipos más comunes son:

Microstrip: este tipo de línea de transmisión está formada por una delgada tira de metal sobre un sustrato dieléctrico. Las líneas de transmisión microstrip son relativamente fáciles de fabricar y se utilizan ampliamente en aplicaciones de microondas y ondas milimétricas. En la Figura 1.4 se puede observar su geometría y la forma de sus campos eléctrico y magnético.



(a) Geometría



(b) Líneas de campo eléctrico y magnético

Figura 1.4: Línea de transmisión microstrip [1]

Stripline: este tipo de línea de transmisión es similar a la microstrip, pero la tira se ubica en el medio del sustrato, entre dos capas de material dieléctrico como se puede observar en la Figura 1.5. Las líneas de transmisión stripline son menos susceptibles a la interferencia electromagnética externa que las líneas de transmisión microstrip, pero son más difíciles de fabricar.

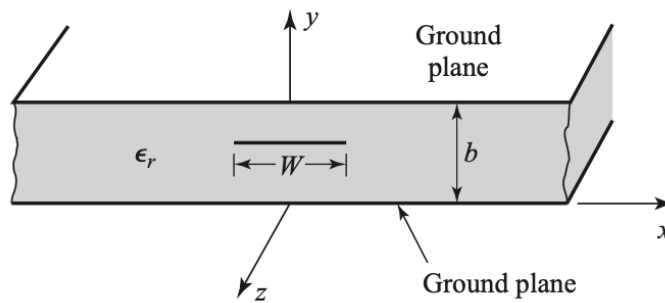
Es importante estudiar la impedancia de esta línea, ya que se utilizará este modelo para calcular la impedancia de una Ridge Gap Waveguide (RGW).

Para encontrar el valor de la impedancia característica de la stripline, se tiene [1]:

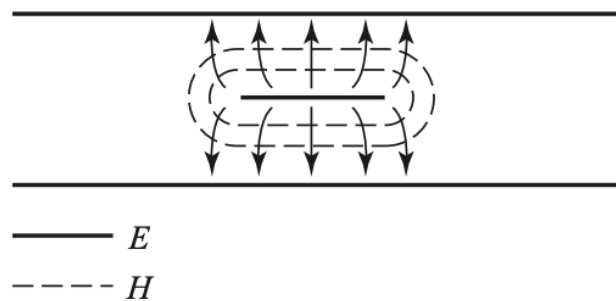
$$Z_{stripline} = \frac{\eta}{4} \left(\frac{W_e}{2h} + 0.441 \right)^{-1} \quad (1.1)$$

Donde:

$$\frac{W_e}{2h} = \frac{W}{2h} - \begin{cases} 0, & W/2h > 0.35 \\ (0.35 - W/2h)^2, & W/2h \leq 0.35 \end{cases} \quad (1.2)$$



(a) Geometría



(b) Líneas de campo eléctrico y magnético

Figura 1.5: Línea de transmisión stripline [1]

Guía de ondas coplanares (CPW): este tipo de línea de transmisión es similar a la microstrip, pero tiene un plano de tierra a cada lado de la tira. Esto mejora el blindaje de la línea de transmisión, haciéndola menos susceptible a interferencias electromagnéticas externas.

Slotline: este tipo de línea de transmisión se compone de una ranura cortada en una lámina de metal (Figura 1.7), que luego se coloca sobre un sustrato dieléctrico.

Las líneas de transmisión planas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluidos los sistemas de comunicación de microondas y ondas milimétricas, las redes de alimen-

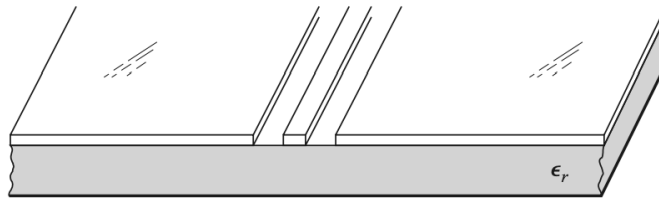


Figura 1.6: Guía de onda coplanar [1]

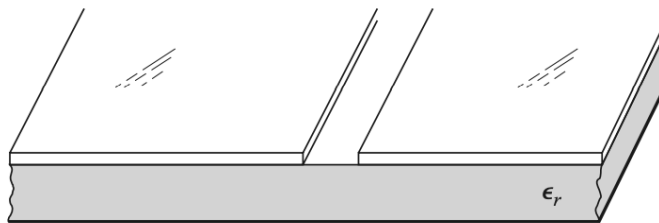


Figura 1.7: Slotline [1]

tación de antenas y los circuitos integrados. También se utilizan en la investigación para estudiar las propiedades de las ondas electromagnéticas en frecuencias de microondas y ondas milimétricas.

1.4.2 REVISIÓN BÁSICA DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN

En ingeniería de microondas, los parámetros S son una forma de describir las propiedades de transmisión de un circuito o dispositivo. Estos parámetros se utilizan para describir la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida de un circuito, y también pueden utilizarse para describir la relación entre la corriente y el voltaje en un punto específico del circuito. Los parámetros S se representan mediante una matriz $\mathbf{N} \times \mathbf{N}$, y se utilizan para describir las propiedades de transmisión en un sistema de \mathbf{N} terminales. [3]

En una red de \mathbf{N} accesos, se definen \mathbf{N} planos de referencia, en los que se toman en consideración tanto ondas incidentes a_N como las ondas reflejadas b_N . La matriz de dispersión del circuito permite establecer una relación entre las ondas incidentes y reflejadas.

En términos matemáticos, la matriz de dispersión se define de la siguiente manera:

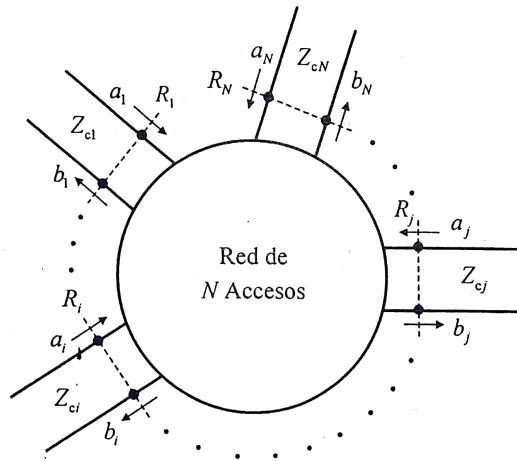


Figura 1.8: Red de N accesos [3]

$$b = Sa \Rightarrow \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ S_N & S_{N2} & \dots & \dots & S_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix}$$

Permiten analizar y diseñar sistemas de comunicaciones de microondas, sistemas de radar, sistemas de transmisión de energía, entre otros.

1.4.2.1 Reciprocidad

La reciprocidad es un principio fundamental en el análisis y diseño de circuitos y sistemas de microondas, que se refiere a la propiedad de un circuito o sistema de responder de la misma manera a una señal de entrada independientemente de si se aplica a la entrada o a la salida.

En otras palabras, si un circuito o sistema tiene la propiedad de reciprocidad, entonces la relación entre la corriente y el voltaje en cualquier punto del circuito o sistema será la misma independientemente de si la señal se aplica a la entrada o a la salida. De esta manera, las propiedades de transmisión de un sistema se describen mediante una función matemática única, independiente del sentido de la señal.

La reciprocidad es una propiedad deseable en los sistemas de microondas ya que permite que los diseños sean más simples y fáciles de analizar. Sin embargo, no todos los sistemas

tienen la propiedad de reciprocidad, y hay métodos para analizar y diseñar sistemas no recíprocos.

Los parámetros S para una red recíproca se representan mediante una matriz cuadrada de tamaño $N \times N$, donde N es el número de entradas y salidas de la red. La matriz S para una red recíproca es simétrica, es decir, el elemento S_{ij} es igual al elemento S_{ji} para cualquier i, j . Esto significa que los parámetros de transmisión son los mismos independientemente del sentido de la señal.

1.4.2.2 Red Sin Pérdidas

Una red sin pérdidas es aquella que no desperdicia energía en forma de calor. Esto significa que la energía que se introduce en la red se transmite sin pérdidas de un punto a otro. Así, la amplitud de la señal se mantiene constante a lo largo de la red, mientras que la fase de la señal puede cambiar debido a características de la red, como la longitud y la impedancia característica. [1]

En una red sin pérdidas, la energía se transmite sin disipación debido a la ausencia de elementos disipativos, como resistencias o dieléctricos con pérdidas. Esto significa que la energía que se introduce en la red se conserva y se transmite de manera eficiente, lo cual es importante en aplicaciones de alta frecuencia, como en la comunicación inalámbrica y en la electrónica de microondas.

En la práctica, es difícil encontrar una red completamente sin pérdidas, ya que la mayoría de los componentes y dispositivos tienen alguna cantidad de pérdida, pero se pueden diseñar sistemas y redes con pérdidas muy bajas.

Los parámetros de dispersión (S) para una red sin pérdidas se representan mediante una matriz cuadrada de tamaño $N \times N$, donde N es el número de entradas y salidas de la red. La característica principal de los elementos de la matriz S para una red sin pérdidas es que la suma de los cuadrados de las magnitudes de los elementos de cada columna es igual a 1.

1.4.2.3 Red Con Pérdidas

Una red con pérdidas es una red o circuito en el cual hay una atenuación o disipación de potencia a medida que la señal se propaga a través de ella. Esto significa que no toda la potencia de entrada se trasmite a la salida, sino que alguna cantidad de ella se pierde debido a las características de los componentes y dispositivos que componen la red.

La matriz S de una red con pérdidas indica que la amplitud de la onda incidente disminuye por la pérdida en la línea de transmisión.

1.4.3 ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA GAP WAVEGUIDE

1.4.3.1 Introducción

La tecnología Gap Waveguide (GW) es una forma de guiar ondas electromagnéticas usando estructuras periódicas con un pequeño espacio entre ellas. Esta guía está diseñada para trabajar en frecuencias de microondas y ondas milimétricas y se podría usar en una variedad de aplicaciones. Esta tecnología ofrece un alto rendimiento, baja pérdida de inserción, alta fiabilidad y una mejora en la capacidad de manejo de potencia en comparación con otras tecnologías de guiado de onda.

El principio de funcionamiento de la tecnología GW se basa en dos placas paralelas, una de tipo PEC y otra de tipo PMC, con una separación menor a $\lambda/4$, en la cual no se puede propagar ninguna onda. Sin embargo, si se agrega una tira PEC sobre la placa PMC, las ondas podrán propagarse por el espacio entre las placas PEC. Esto se debe a que la tira PEC está rodeada por la placa PMC en ambos lados, evitando que las ondas se propaguen en otras direcciones.

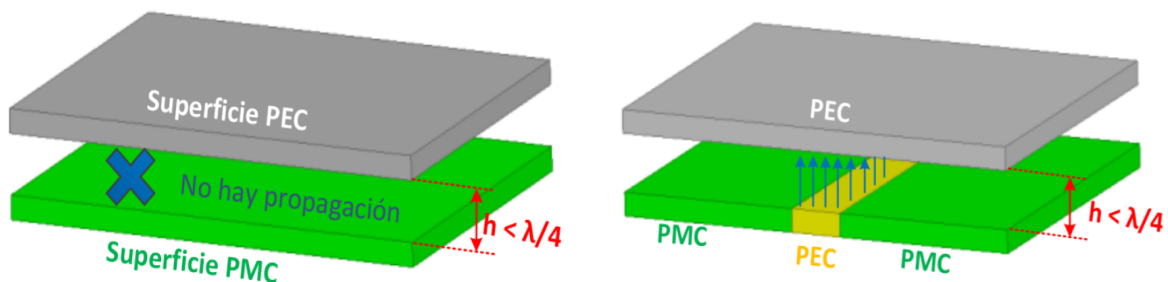


Figura 1.9: Funcionamiento de las guías Gap [4]

Una de las principales ventajas de las guías de ondas tipo gap es su baja pérdida, lo que les permite transmitir señales a largas distancias con una atenuación mínima de la señal. Esto las hace adecuadas para comunicaciones de ondas milimétricas y microondas de larga distancia. También tienen un tamaño compacto y se pueden integrar fácilmente en una variedad de dispositivos y sistemas electrónicos.

Además de las comunicaciones de microondas y ondas milimétricas, las guías de ondas tipo gap metálicas también se utilizan en una variedad de otras aplicaciones, que incluyen detección, espectroscopia, imágenes médicas, entre otras.

Un estudio, expuso el uso de guías de onda fotónicas para transmitir y rechazar frecuencias de pulsos THz. Estas guías consisten en una placa de silicio con una superficie de brecha fotónica metálica PBG, que filtra las frecuencias. Pueden cambiar de un filtrado de paso de banda estrecha a un filtrado de rechazo de banda estrecha al invertir sus estructuras (Figura 1.10). Estas guías de onda fotónicas tienen respuestas extremadamente nítidas en regiones de hasta 1 THz, con bandas de parada o de transmisión que tienen contrastes de hasta 90 dB. [5]

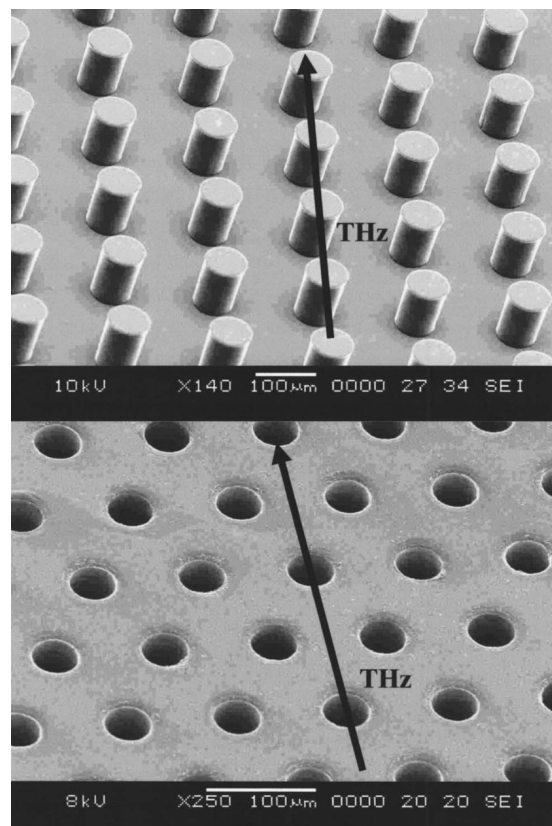


Figura 1.10: La imagen superior es la superficie PBG tipo I. La imagen inferior es la superficie PBG tipo II. [5]

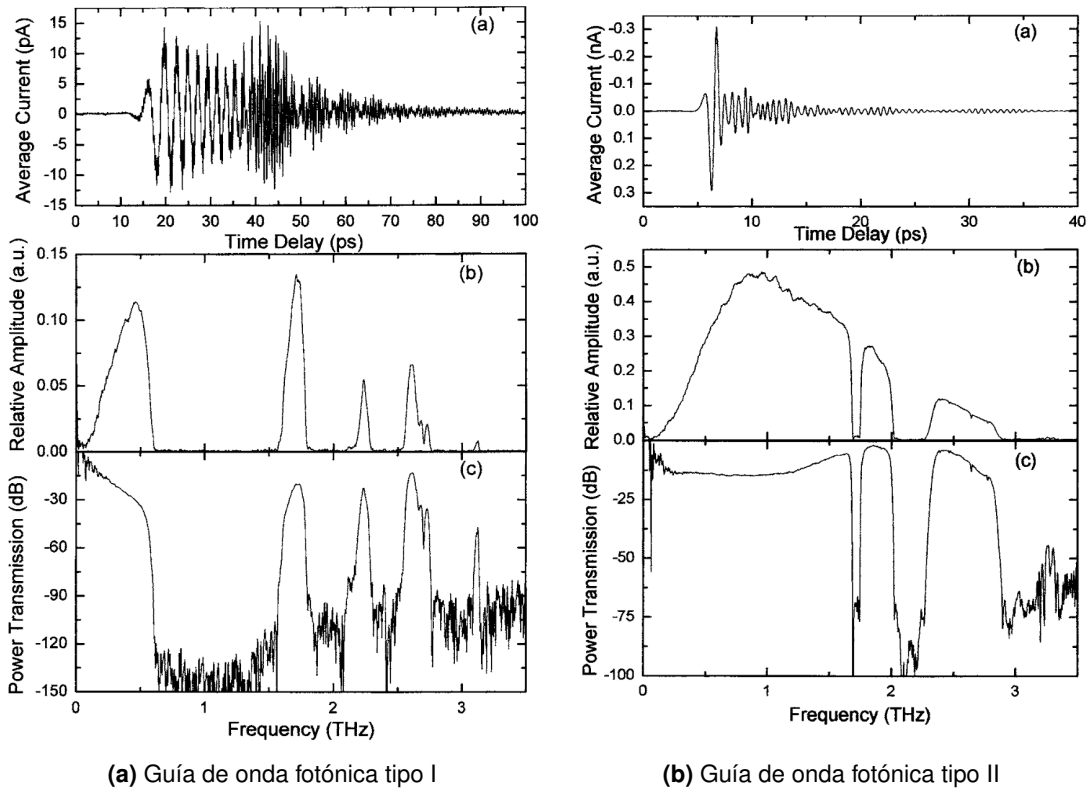


Figura 1.11: Resultados Guía de Onda Fotónica[5]

La tecnología ridge también se aplica en la terapia por hipertermia, en la que se emplea energía electromagnética para aumentar la temperatura de los tejidos cancerosos, lo que puede destruir las células cancerosas. Este artículo explica el diseño y la ejecución de una guía de onda tipo ridge para la terapia por hipertermia profunda. [6]

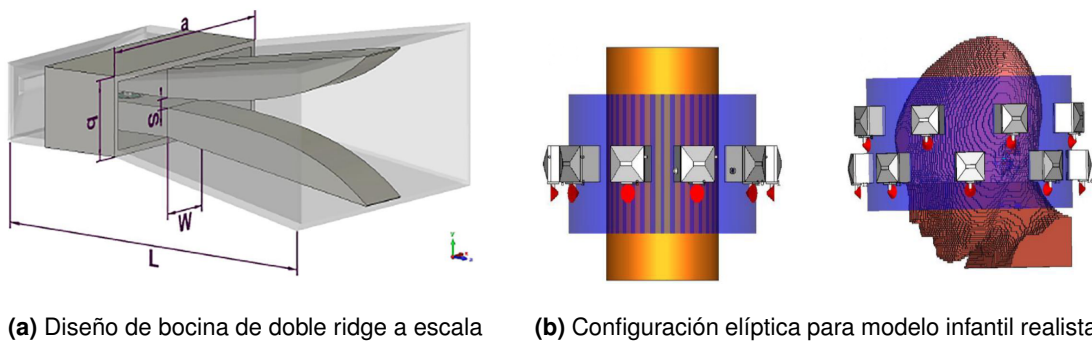


Figura 1.12: Antena con tecnología en guía de onda tipo ridge [6]

Otro estudio propone una nueva estructura para antenas de apertura planar (Figura 1.13). Esta utiliza la tecnología de guía de onda gap y el concepto de bocina de plano H para crear una configuración plana capaz de proporcionar radiación direccional con un ancho de banda de impedancia razonable, alta ganancia y bajos lóbulos laterales. Se discute en detalle el procedimiento de diseño tanto para la capa radiante como para la red de alimentación.

Además, se presenta una muestra de antena diseñada para operar en la banda Ku con una buena eficiencia de radiación. [7]

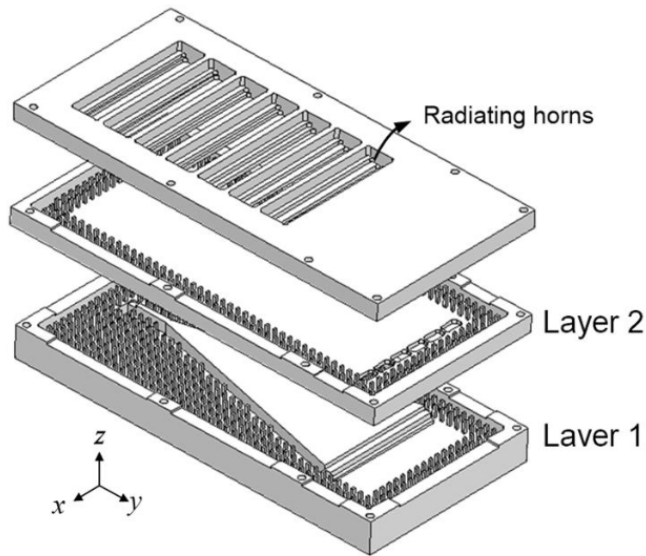


Figura 1.13: Vista 3D de la topología de antena propuesta [7]

En otro artículo se trata el diseño, simulación y análisis de filtros pseudoelípticos de guía de onda. Donde se utilizan modos no resonantes con resonadores de guía plegada y tipo ridge (Figura 1.14). Además, se presentan resultados experimentales que demuestran la eficacia de la técnica propuesta. [8]

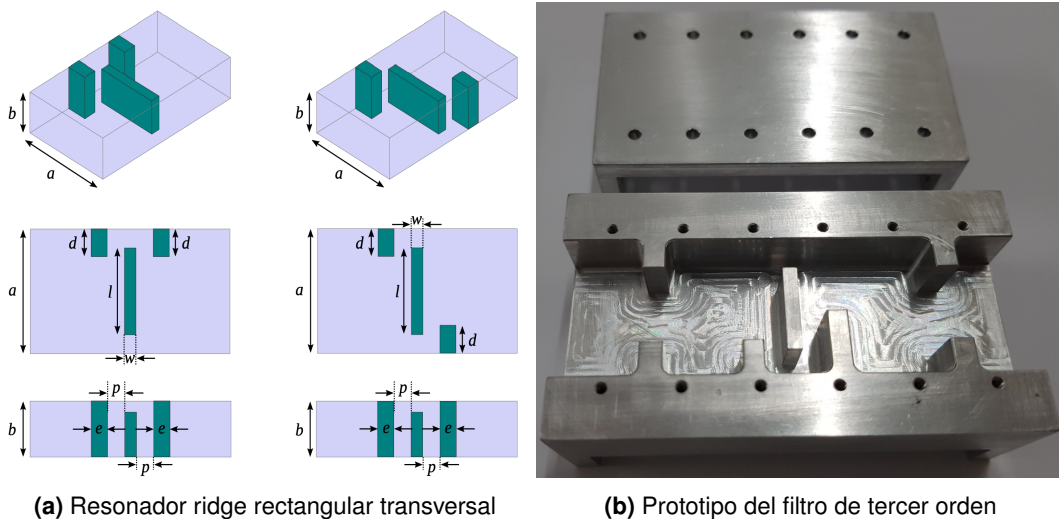


Figura 1.14: Filtros de guía de ondas usando modos no resonantes [8]

Además, se puede utilizar la tecnología Ridge en una estructura híbrida que combina Ridge Waveguide y Guía de Onda Circular (Figura 1.15) con el fin de mejorar la eficiencia de acoplamiento entre la fuente de alimentación y la guía de onda. [9]

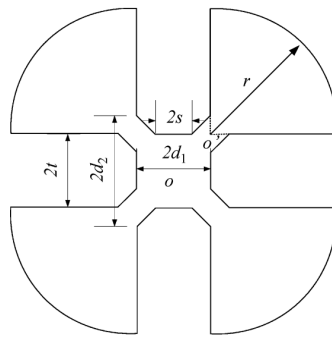


Figura 1.15: Geometría de una guía de onda circular tipo ridge cortada sus esquinas [9]

Otra área de estudio sobre las guías de onda tipo gap se ha centrado en la integración de estas guías de ondas en varios dispositivos y sistemas electrónicos. Esto incluye la investigación sobre el diseño de nuevos componentes de guía de ondas, como filtros y acopladores direccionales, así como el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación para producir estos componentes.

En un artículo se sugiere una nueva forma de integrar ondas milimétricas de banda W en una guía de onda tipo groove gap para su uso en MMIC y aplicaciones de antena. La transición se logra mediante un resonador de parche triangular microstrip planar modificado con un cortocircuito interno, cuyo funcionamiento es similar al de un filtro pasabanda basado en resonadores acoplados (Figura 1.16). Esta propuesta podría ser útil en sistemas de radar y comunicación de banda W. Se ha fabricado y ensamblado un prototipo de transición de ida y vuelta para su medición, y los resultados muestran una excelente banda de paso de transición de 90GHz a 99.5GHz. [10]

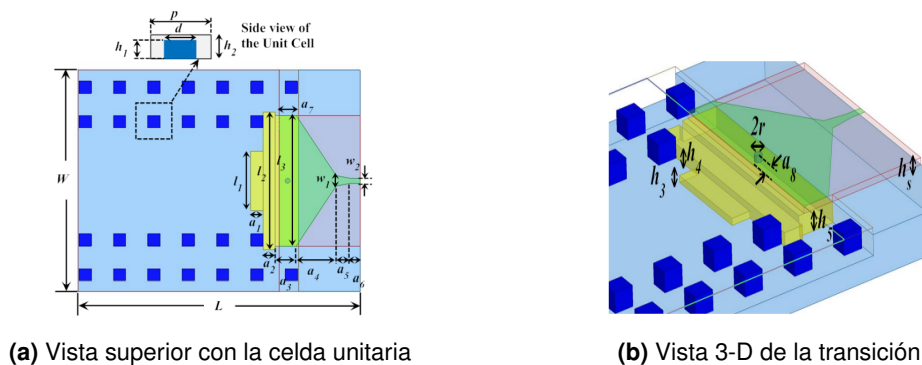


Figura 1.16: Transición de la línea microstrip a la groove GWG [10]

También se ha estudiado el uso de una técnica de empaquetamiento basada en conductores magnéticos perfectos (PMC) para mejorar el rendimiento de aislamiento entre los componentes del circuito de microondas. La técnica implica la creación de una banda de parada

para los modos no deseados mediante una estructura periódica y una placa de tierra (Figura 1.17). Se probaron dos cadenas de amplificadores de banda Ka, logrando la nueva técnica de empaquetamiento una ganancia estable de >65 dB y un aislamiento mínimo de 78 dB entre dos cadenas de amplificadores de alta ganancia, mostrando una mejora significativa sobre el empaquetamiento de paredes metálicas tradicional. [11]

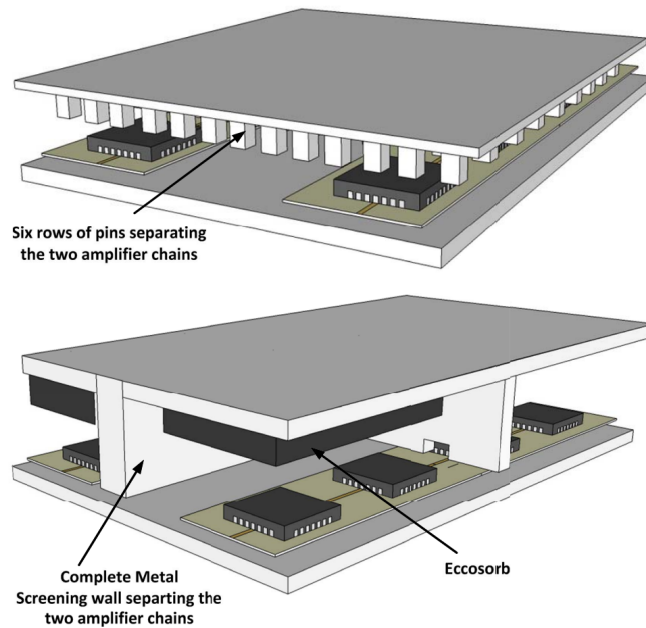


Figura 1.17: Estructura Aislante con Ridge Gap [11]

En general, la investigación y el desarrollo en torno a las guías de onda gap han sido amplios. Se han desarrollado nuevas tecnologías y técnicas para mejorar su rendimiento y aumentar su disponibilidad en varios campos.

1.4.3.2 Estructuras Periódicas

Las estructuras periódicas son estructuras que tienen un patrón repetitivo de elementos a lo largo de una cierta distancia. Estos elementos pueden ser de diferentes tipos, como formas geométricas, materiales o incluso campos electromagnéticos. Las estructuras periódicas se utilizan a menudo en una amplia gama de aplicaciones, incluidas la óptica, la fotónica, las comunicaciones por microondas y ondas milimétricas y la ciencia de los materiales.

Una de las principales ventajas de las estructuras periódicas es que pueden utilizarse para manipular las propiedades de las ondas electromagnéticas, como la dirección de propagación, la polarización y la frecuencia. Esto se logra ajustando las propiedades de los

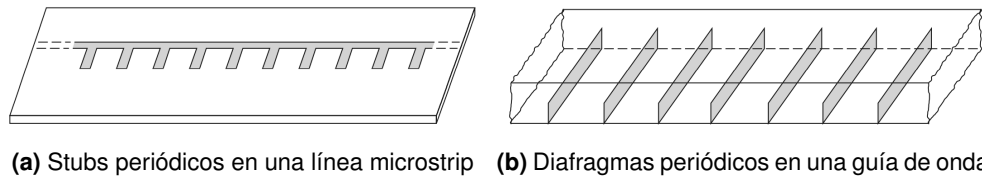


Figura 1.18: Ejemplos de estructuras periódicas [1]

elementos individuales que componen la estructura, como su forma y tamaño.

Las estructuras periódicas tienen diversas aplicaciones en el campo de la óptica, tales como la creación de filtros ópticos y polarizadores de alta calidad, el diseño de espejos ópticos con propiedades especiales y la fabricación de lentes de enfoque. En particular, las estructuras periódicas de tamaño submicrométrico han sido empleadas para la fabricación de nanoestructuras ópticas con aplicaciones en la plasmónica y la nanofotónica. [12]

En la ciencia de los materiales, las estructuras periódicas se usan para crear nuevos materiales con propiedades únicas, como los metamateriales, que tienen un índice de refracción negativo y se pueden usar para una variedad de aplicaciones, como superlentes, encubrimiento e imágenes de sublongitud de onda.

Las estructuras periódicas se emplean también para estudiar bandas prohibidas o band-gaps, así como la dispersión de ondas en cristales, cristales fotónicos y metamateriales. Se ha descubierto que estas estructuras ofrecen propiedades únicas que se pueden aplicar a una amplia variedad de usos.

En general, las estructuras periódicas presentan una amplia gama de usos debido a su capacidad para influir en las propiedades de las ondas electromagnéticas, lo que las convierte en un área de investigación relevante en múltiples ámbitos.

1.4.3.3 Estructuras Periódicas Tipo Poste

Las estructuras periódicas tipo postes cuadrados son arreglos ordenados y repetitivos de postes rectangulares o cuadrados en un material dieléctrico. Estas estructuras se utilizan en diversas aplicaciones en las que es necesario controlar la propagación de ondas electromagnéticas, como en la fabricación de antenas, filtros, reflectores y otros dispositivos fotónicos.

La periodicidad de estas estructuras permite el control del índice de refracción efectivo del

material, lo que puede afectar la propagación de las ondas electromagnéticas en el interior del mismo. Además, la forma y tamaño de los postes pueden ser ajustados para lograr la respuesta deseada de las ondas electromagnéticas en diferentes frecuencias.

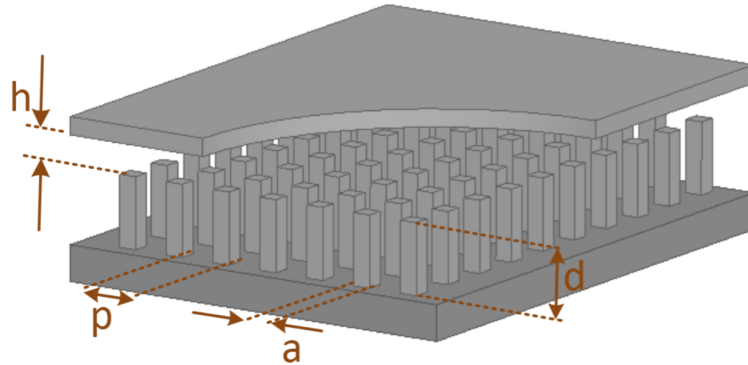


Figura 1.19: Estructura periódica tipo postes cuadrados [4]

El objetivo del diseño de una estructura periódica de pines es determinar el rango de frecuencias prohibidas o “bandgap”. Para conseguir esto, la geometría de los pines es el factor que influye directamente en las frecuencias que se han mencionado.

En la Figura 1.19 se puede observar las dimensiones involucradas en el diseño de la estructura periódica. Donde:

d : altura de los pines

p : separación entre pines

h : altura del aire

a : ancho de cada pin

Para el diseño una estructura periódica, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El límite inferior de la banda prohibida está dado por la altura de los pines d que debe ser aproximadamente igual a $\lambda/4$.
- El límite superior de la banda prohibida está dado $d + h$ que debe ser menor a $\lambda/2$.
- El espacio entre pines p debe ser menor que 0.25λ .
- Conforme disminuye el espacio de aire h , el ancho de banda de la estructura aumenta.

El comportamiento en frecuencia de una celda unitaria de una estructura periódica como la de la Figura 1.19, se muestra en la Figura 1.20. Se puede ver que existe un rango de

frecuencia en el cual ningún modo puede propagarse por la guía. Este rango de frecuencias en el cual no se permiten modos que se propaguen, se conoce como "Band gap".

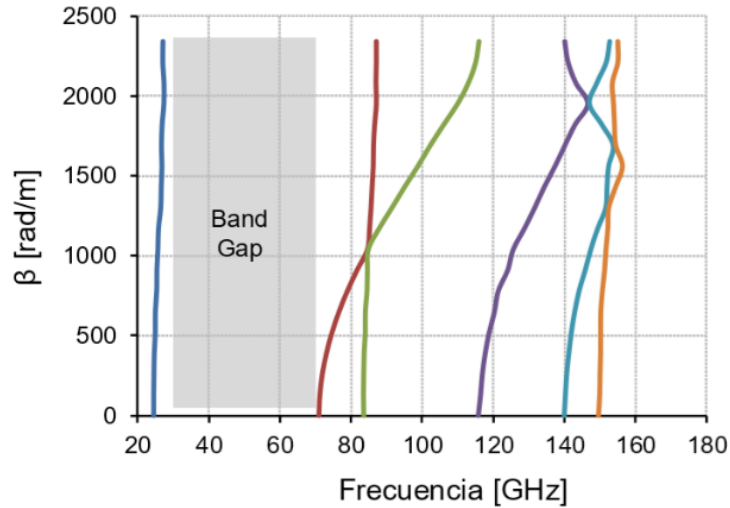


Figura 1.20: Bandgap formado por una estructura periódica [4]

En un artículo, se discute la analogía entre la propagación de ondas electromagnéticas en estructuras periódicas multidimensionales y la propagación de ondas de electrones en cristales reales. El enfoque se centra en la búsqueda de una banda prohibida de frecuencia en estructuras dieléctricas tridimensionales, también conocida como brecha de banda fotónica. El artículo revisa las motivaciones tempranas de esta investigación, describe cómo los semiconductores fotónicos pueden ser dopados para producir pequeñas cavidades electromagnéticas y resume algunas de las posibles consecuencias de la estructura de banda fotónica para la electrónica cuántica y otras áreas de la física y la ingeniería eléctrica. [12]

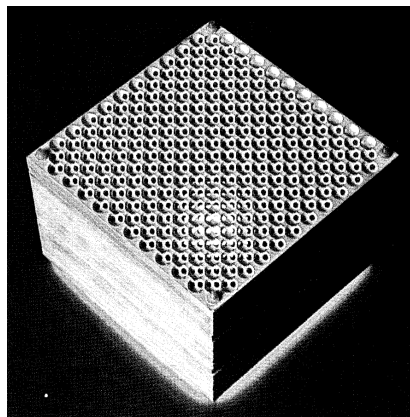


Figura 1.21: Estructura Yablónovite. Cristales fcc, consistentes en vacíos esféricos. [12]

1.4.3.4 Ridge Gap Waveguides

Una guía de ondas Ridge Gap (RGW) se forma a través del espacio entre dos placas metálicas paralelas. La placa superior es plana, mientras que en la placa inferior se encuentra el conjunto de pines metálicos. Además, entre los pines está situada la tira ridge que será la encargada del guiado de ondas electromagnéticas a lo largo de un camino determinado.

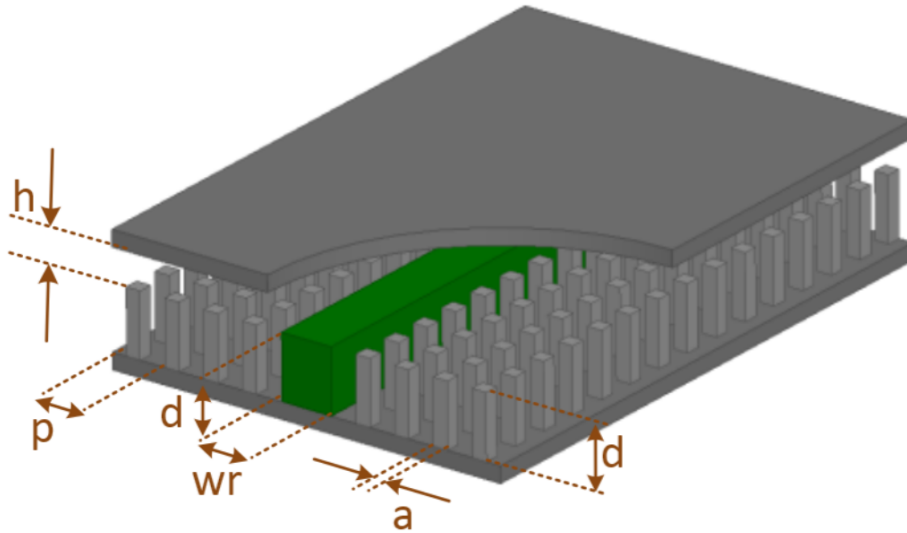


Figura 1.22: Estructura y dimensiones de una Ridge Gap Waveguide [4]

Para modelar la estructura de la Figura 1.22, se necesita conocer el ancho de la tira ridge W_r . Este valor se puede calcular usando la fórmula 1.1, que se emplea para calcular la impedancia de una stripline (Figura 1.23). Sin embargo, al comparar la geometría de la RGW y la stripline, se puede concluir que la impedancia de la RGW es el doble de la stripline.

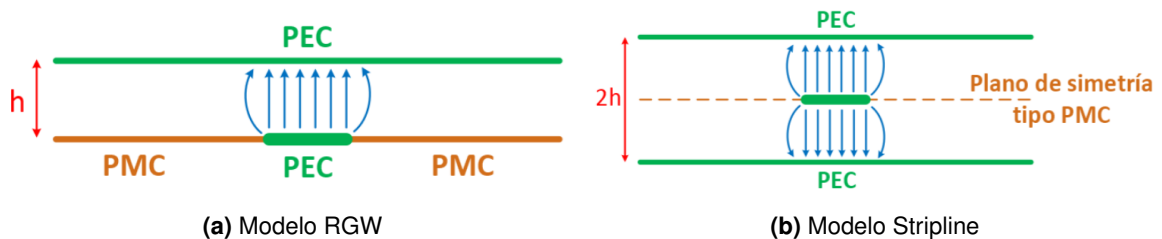


Figura 1.23: Modelos cálculo de impedancia [4]

Por lo tanto, la impedancia de la tira ridge es igual a:

$$Z_{RGW} = 2Z_{strip} \quad (1.3)$$

De esta manera, la RGW bloquea todos los modos de transmisión excepto uno, el cual se transmite sobre la tira ridge. Esto se puede observar en la Figura 1.24.

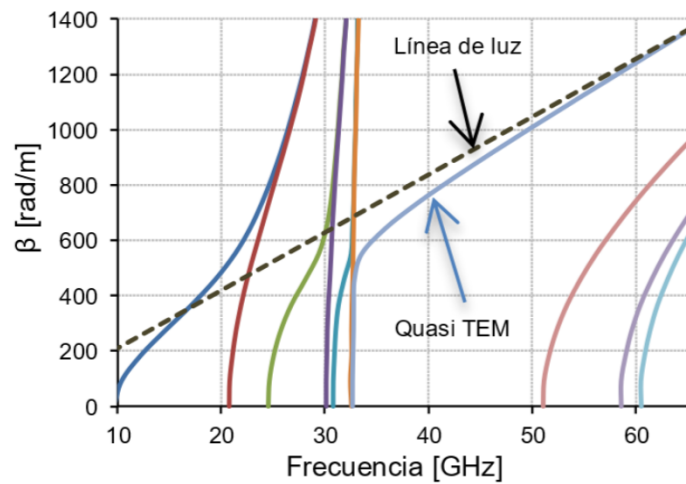


Figura 1.24: Respuesta en frecuencia de una celda unitaria con tira ridge [4]

La guía de onda está diseñada para guiar ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de microondas o de ondas milimétricas, y a menudo se usa en aplicaciones como comunicaciones por satélite, sistemas de radar y redes inalámbricas.

Una de las principales ventajas de las guías de ondas Ridge Gap metálica es que tienen una pérdida baja, lo que significa que pueden transmitir señales a largas distancias con una degradación mínima de la señal. También tienen un tamaño compacto y se pueden integrar fácilmente en una variedad de dispositivos y sistemas electrónicos. Además, son relativamente fáciles de fabricar y se pueden construir con una variedad de materiales, incluidos metales, semiconductores y dieléctricos.

En resumen, las guías de onda Ridge Gap son una tecnología de guiado de onda muy eficaz y versátil que se puede aplicar en una amplia variedad de aplicaciones.

2 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describirán los pasos detallados para el diseño y simulación de una RGW. Se incluirá una descripción de los materiales y herramientas necesarios para llevar a cabo la implementación, así como una guía para la selección de los parámetros de diseño adecuados. También se describirá el proceso de simulación utilizando software de simulación electromagnética y se proporcionará la interpretación de los resultados de la simulación.

Se utilizan los parámetros de dispersión de los modelos simulados, a fin de garantizar que se obtengan los mejores resultados posibles. Se examina de forma minuciosa cada parámetro, para asegurar que todas las variables relevantes sean tomadas en cuenta y que los resultados tengan un adecuado nivel de precisión. Esta revisión cuidadosa es fundamental para garantizar que los parámetros de dispersión sean ajustados de manera óptima para lograr el objetivo deseado.

Tras la revisión bibliográfica, se calcularon las dimensiones requeridas para la Ridge Gap Waveguide. Esta guía es adecuada para aplicaciones de alta frecuencia. Por tanto, es necesario realizar los cálculos adecuados para determinar su tamaño óptimo con el objetivo de alcanzar el mejor rendimiento. Para garantizar mayor precisión, se realizaron ensayos con diferentes dimensiones para verificar los resultados.

Utilizando el esquema de la Figura 1.19 y las consideraciones mencionadas, las dimensiones de los pines determinarán el rango de la banda prohibida y su ancho. Para una frecuencia de 35GHz, el valor de la longitud de onda es el siguiente:

$$\begin{aligned}\lambda &= c/f && (2.1) \\ \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{35 \times 10^9} \\ \lambda &= 8,57mm\end{aligned}$$

Una vez calculado el valor de la longitud de onda, es posible determinar las dimensiones de la estructura de pines. Para ello, se tiene que el valor d correspondiente a la altura de los postes viene dado por:

$$d = \lambda/4 \quad (2.2)$$

$$d = \frac{8,57mm}{4}$$

$$= 2,1425mm$$

Donde d es la variable que determina el límite inferior de la banda prohibida.

Para determinar el límite superior de la banda prohibida, se debe calcular $d + h$, donde h corresponde a la altura del aire (Figura 1.22). Entonces se tiene que:

$$d + h = \lambda/2 \quad (2.3)$$

Como el valor de la altura de los postes d ya es conocido, se puede hallar la variable h de la siguiente manera:

$$d + h = \frac{8,57mm}{2}$$

$$= 4,285mm$$

$$\Rightarrow h = 2,1425mm$$

Es importante recordar que el valor de h determina el ancho del bandgap. A medida que h aumenta, el ancho del bandgap disminuye.

Para calcular la separación entre postes p se tiene que:

$$p = 0,25\lambda \quad (2.4)$$

$$p = 2,1425mm$$

Para lograr que la Ridge Gap Waveguide(RGW) atenúe los modos no deseados, se asume que el ancho de los pines, a , tiene un valor igual a:

$$a = 1,75\text{mm} \quad (2.5)$$

Con el fin de cumplir con las especificaciones requeridas, se procedió a modelar la celda unitaria mediante el uso del software Ansys HFSS, con el objetivo de generar un bandgap en el rango de frecuencias deseado.

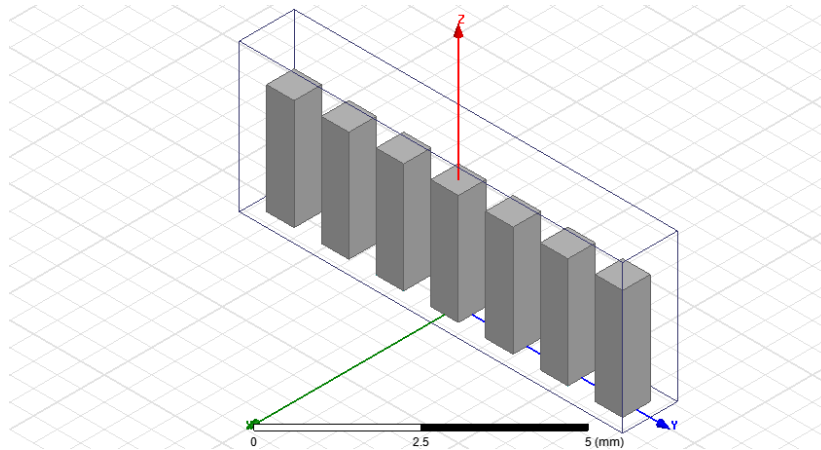


Figura 2.1: Celda Unitaria a 35GHz

En la Figura 2.1 y 2.2 se muestra el modelo en 3D de una celda unitaria formada por postes rectangulares. Las dimensiones de estos postes corresponden a las medidas teóricas calculadas.

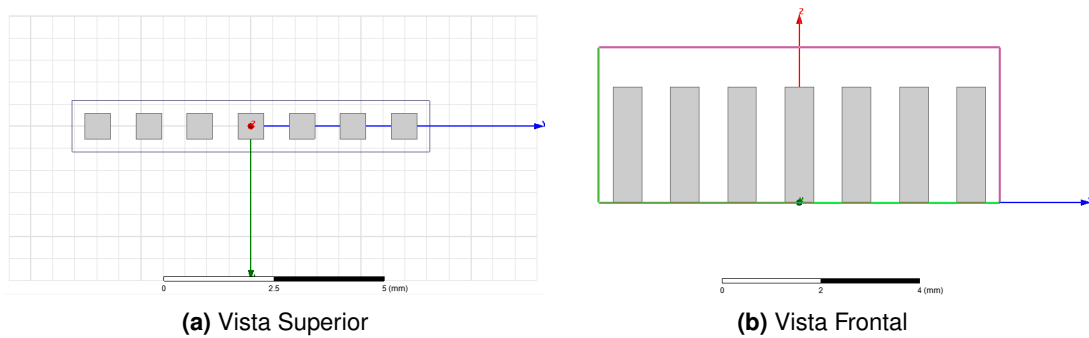


Figura 2.2: Celda Unitaria a 35GHz

Una vez que se ha modelado la celda unitaria, se procede a realizar la simulación de la estructura con el objetivo de analizar los resultados obtenidos y observar el bandgap deseado. De ser necesario, se optimiza la geometría de la estructura para que pueda operar a la frecuencia establecida de 35 GHz.

Como se puede observar en el diagrama de dispersión de la Figura 2.3, la estructura de pines diseñada cumple con la creación de un bandgap en bandas milimétricas. El límite

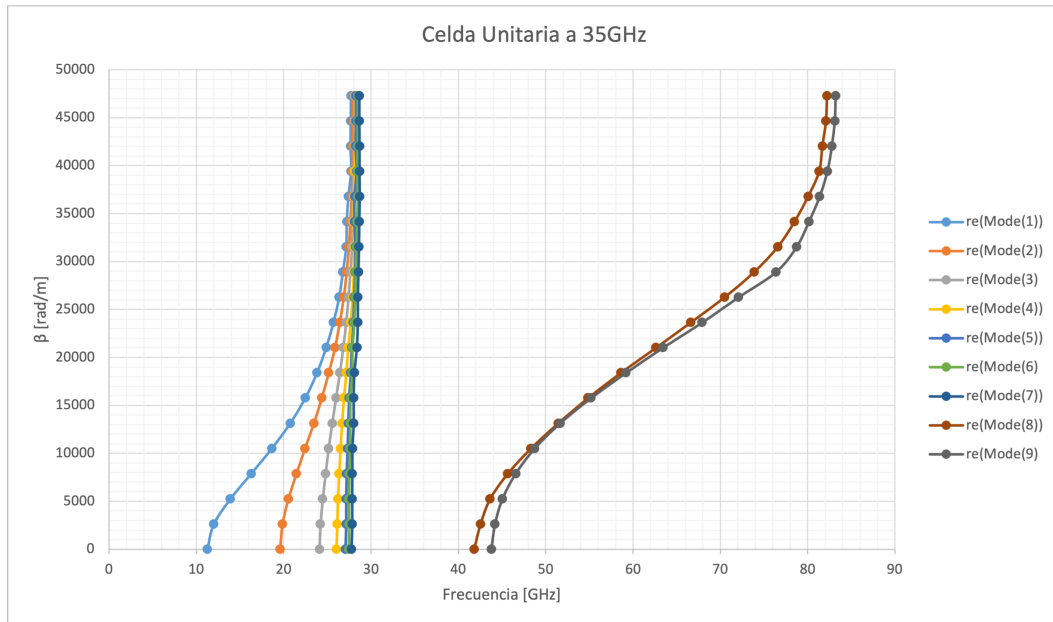


Figura 2.3: Diagrama de dispersión a 35GHz

inferior de la banda prohibida corresponde a un valor de $28GHz$, mientras que el límite superior de la banda prohibida es igual a $42GHz$. Se debe tener en cuenta que para modificar los límites en frecuencia, solo es necesario ajustar los valores de las dimensiones de la altura de los pines d y la altura del aire h .

Una vez que se verificó que la celda unitaria cumple con los requisitos necesarios, se procedió a implementar una tira ridge en el centro de la celda. El propósito de este paso es corroborar la existencia de un solo modo propagándose dentro del bandgap a la frecuencia establecida.

Para lograr este objetivo, es necesario calcular el ancho de la tira ridge para que cumpla con una impedancia característica de 50 ohmios. Esta impedancia es muy común en la industria electrónica y se encuentra en la mayoría de los dispositivos, por lo que implementar este valor de impedancia evitará que la señal se refleje y se produzcan pérdidas de energía si se requiere integrar con otro dispositivo.

Utilizando las fórmulas 1.1 y 1.2, se calculó el ancho de la tira ridge, teniendo en cuenta los siguientes valores:

$$\epsilon_r = 1$$

$$h = 2,1425mm$$

$$f = 35GHz$$

$$Z_0 = 50\Omega$$

Se tiene que:

$$W = 9,83193mm$$

Según los valores calculados, se modela la celda unitaria con la tira ridge (Figura 2.4) en el software de simulación electromagnética.

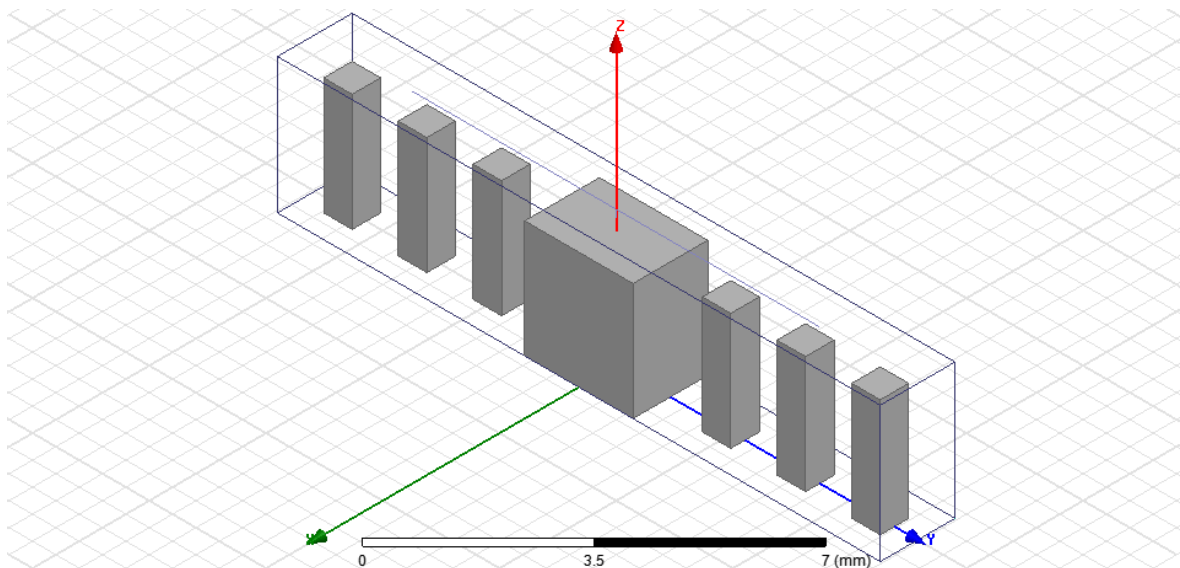


Figura 2.4: Celda Unitaria con Ridge a 35GHz

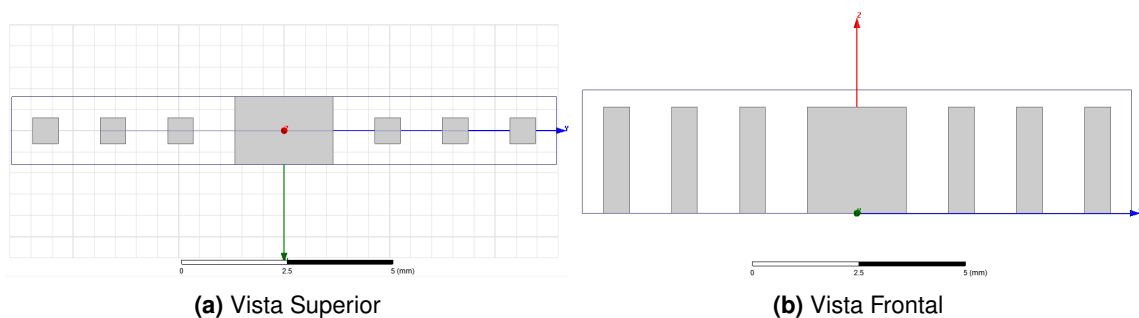


Figura 2.5: Celda Unitaria con Ridge a 35GHz

Una vez que el modelo está preparado, se procede a simular la estructura para observar cómo se propaga un solo modo dentro del bandgap. Como se explicó en el marco teórico, esto se debe a que tanto la tira ridge como la tapa superior son de tipo PEC, lo que permite que la onda viaje por el espacio libre entre ambas partes.

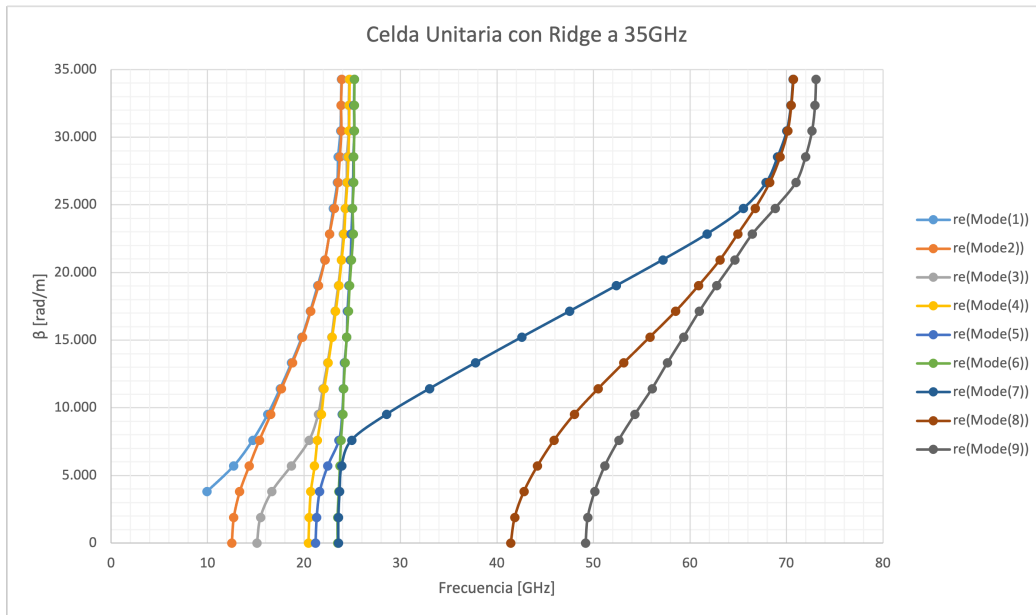


Figura 2.6: Diagrama de dispersión a 35GHz

En el diagrama de dispersión de la Figura 2.6 se puede observar cómo la celda unitaria con tira ridge actúa como una superficie PEC, permitiendo la propagación de ondas electromagnéticas entre la tira ridge y la tapa superior de la estructura dentro de la banda de frecuencias o bandgap. Por otro lado, para frecuencias por encima y por debajo del bandgap, la celda unitaria con tira ridge pierde este comportamiento y las ondas se propagan en cualquier dirección dentro de la cavidad de placas paralelas.

Una vez que se ha confirmado que la estructura periódica actúa como una superficie AMC que impide la transmisión de modos dentro del ancho de banda establecido (Bandgap) y que el único modo que puede propagarse lo hace por la tira metálica (ridge), se lleva a cabo la implementación del diseño completo de la Ridge Gap Waveguide en el software de simulación electromagnética Ansys HFSS para visualizar los parámetros de dispersión y comprobar su funcionamiento. Esta implementación se realiza con el objetivo de verificar la exactitud de los resultados obtenidos en las simulaciones previas y confirmar el correcto funcionamiento de la tecnología.

Al examinar la magnitud del campo eléctrico para la línea RGW de la Figura 2.8, se nota que cuando las frecuencias están por encima o por debajo del bandgap, la estructura periódica ya no se comporta como una superficie AMC y los modos se propagan en cualquier dirección. No obstante, cuando la frecuencia de la onda está dentro del bandgap, esta viaja a lo largo del camino creado entre la tira ridge y la tapa de la guía.

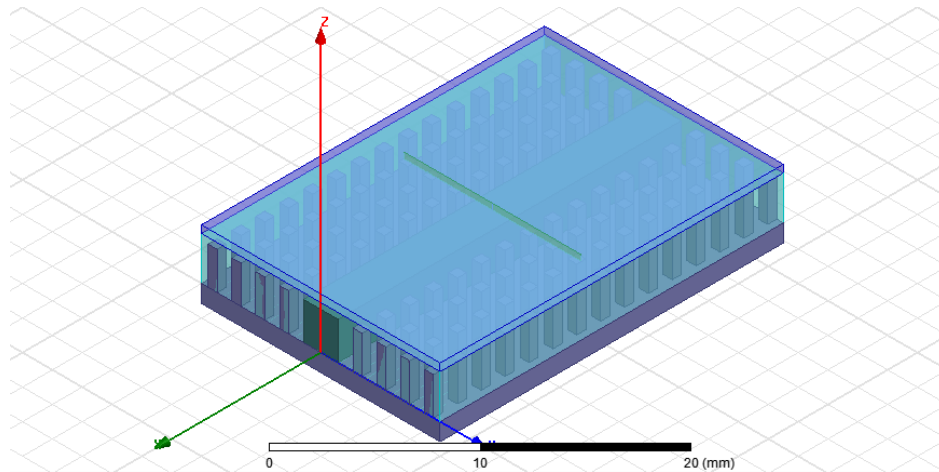


Figura 2.7: Ridge Gap Waveguide a 35GHz

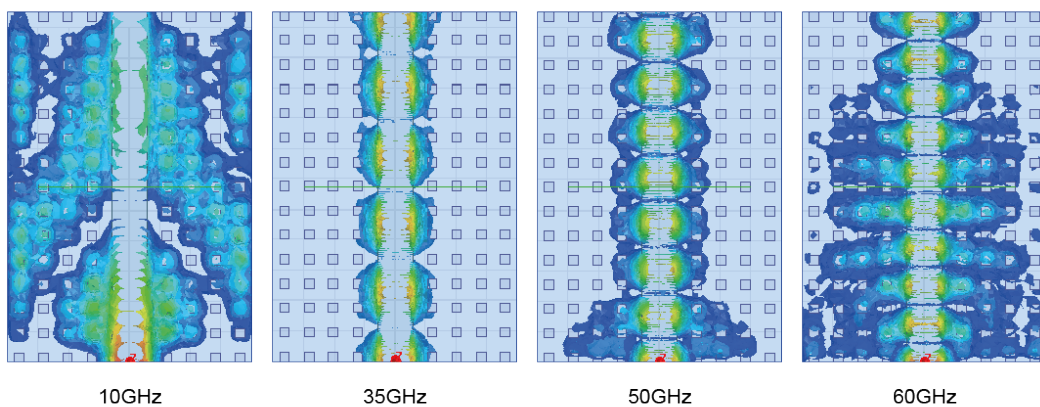


Figura 2.8: Magnitud del campo eléctrico para la RGW a 35GHz

Asimismo, el campo eléctrico transversal de la Figura 2.9 muestra que el Ridge Gap Waveguide, trabajando a la frecuencia de diseño, presenta una distribución de campo constante ubicada sobre la tira Ridge. Sin embargo, a medida que se aleja del centro hacia los pines, la magnitud del campo disminuye rápidamente. En la primera columna de pines, el campo ha disminuido en 20 dB, mientras que a partir de la segunda columna de pines, el campo ya tiene una magnitud inferior a los -35 dB.

En el laboratorio de Medios de Transmisión y Antenas de la Escuela Politécnica Nacional se dispone de una impresora 3D que podría imprimir este tipo de componentes de microondas. Sin embargo, debido a las especificaciones de la impresora, como la precisión necesaria para la tarea, la implementación de los componentes es un desafío, ya que los valores de las dimensiones de los pines y la distancia entre ellos están en el orden de los milímetros. Esto requiere de una precisión muy alta para la impresión, lo que aumenta el costo del proceso.

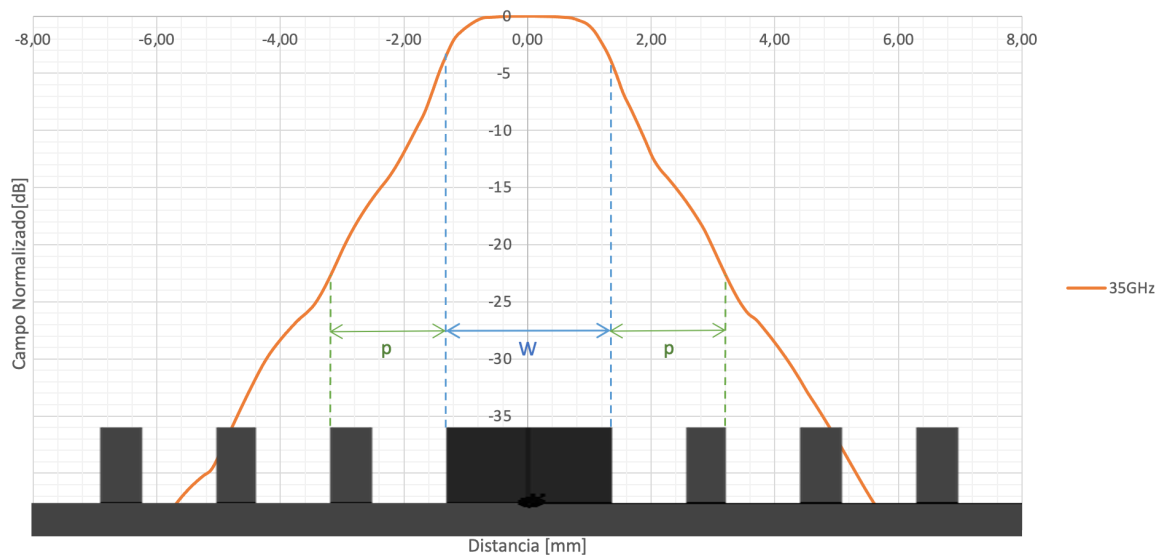


Figura 2.9: Magnitud del Campo Magnético Transversal

Además, si bien la impresión 3D de componentes de microondas puede ser una opción interesante, existen otros métodos de fabricación que podrían ser más eficientes y económicos. Por ejemplo, la técnica de fresado puede ser más adecuada para la fabricación de componentes de microondas con dimensiones tan pequeñas.

Debido a las limitaciones expuestas y con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de la guía tipo ridge, se plantea como solución trasladarse a la banda X, donde las dimensiones de los pines serán mayores.

Una vez que se ha cambiado la frecuencia, se realizan los cálculos necesarios para determinar las nuevas dimensiones de la guía. Estas dimensiones, una vez obtenidas, son empleadas para ejecutar las 3 simulaciones previamente explicadas: celda unitaria, celda unitaria con tira ridge y guía de onda completa. Estas simulaciones son esenciales para la comprensión de la propagación de la onda a una determinada frecuencia, y para obtener los resultados deseados en la guía de onda.

Para llevar a cabo la primera simulación correspondiente a la celda unitaria, se deben realizar los siguientes cálculos:

1. Cálculo de la longitud de onda a la frecuencia central de 10GHz

$$\lambda = c/f$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9}$$

$$\lambda = 30mm$$

2. Cálculo de las dimensiones de la estructura periódica

Altura de los pines:

$$d = \lambda/4$$

$$d = \frac{30mm}{4}$$

$$d = 7,5mm$$

Altura del aire:

$$d + h = \lambda/2$$

$$d + h = \frac{30mm}{2}$$

$$d + h = 15mm$$

$$\Rightarrow h = 7,5mm$$

Separación entre postes:

$$p = 0,25\lambda$$

$$p = 7,5mm$$

Ancho de los postes:

$$a = 1,75mm$$

Utilizando los valores de las dimensiones de los pines, se creó un modelo de la estructura en el software Ansys HFSS. La Figura 2.10 muestra el resultado del modelo.

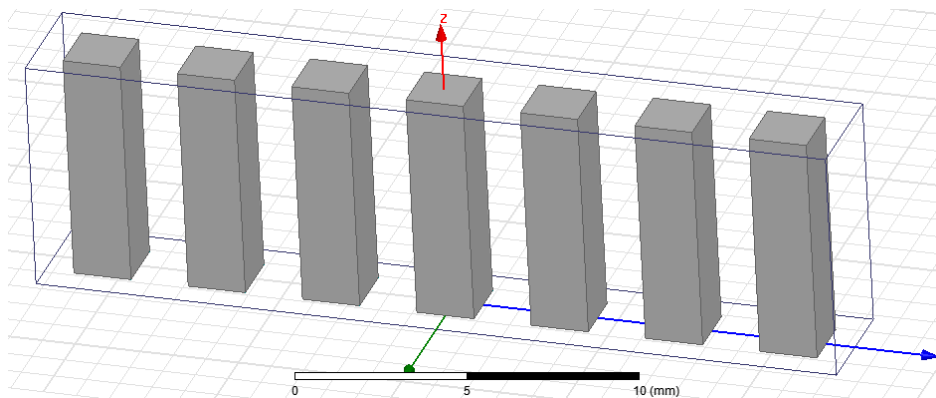


Figura 2.10: Modelo Celda Unitaria a 10GHz

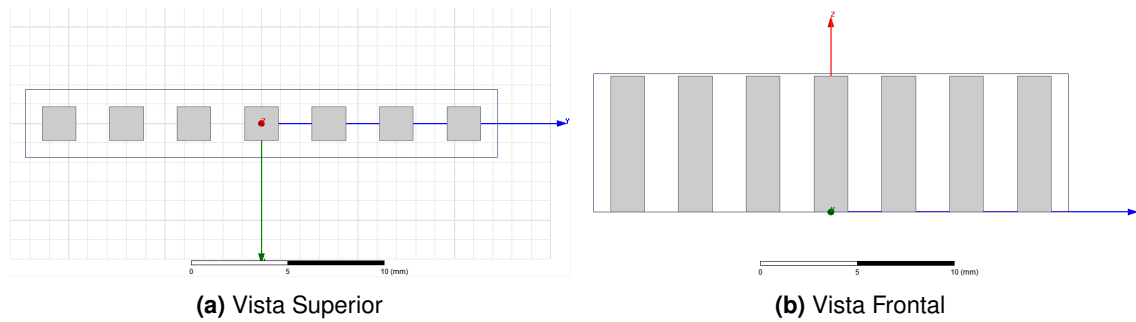


Figura 2.11: Celda Unitaria a 10GHz

Se realiza la simulación de la estructura para observar el diagrama de dispersión correspondiente a la celda unitaria. Como se puede apreciar en la Figura 2.12, el bandgap se ha desplazado en frecuencia hacia la banda X, tal y como se había previsto. El valor aproximado del límite inferior de la banda prohibida es de $5.5GHz$, mientras que el valor aproximado del límite superior de la misma es de $21GHz$.

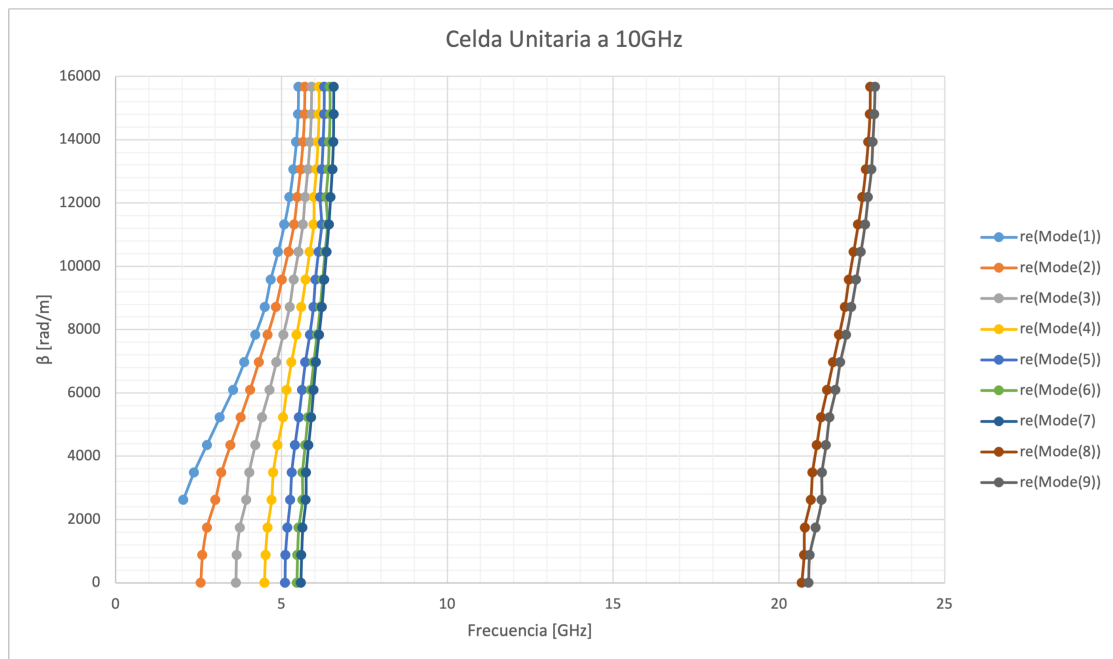


Figura 2.12: Diagrama de Dispersión a 10GHz

Una vez que se ha verificado el correcto funcionamiento de la celda unitaria, se procede a realizar los cálculos necesarios para llevar a cabo la segunda simulación, la cual implica la interacción de la celda unitaria con la tira ride ubicada en su centro.

Ancho de la tira ridge tomando en cuenta los siguientes parámetros:

$$\epsilon_r = 1$$

$$h = 1,5mm$$

$$f = 10GHz$$

$$Z_0 = 50$$

Se tiene que:

$$W = 7.37mm$$

Después de haber calculado el valor del ancho de la tira ridge, se procedió a modelar la celda unitaria con dicha tira ridge en el software de simulación, como se muestra en la Figura 2.13.

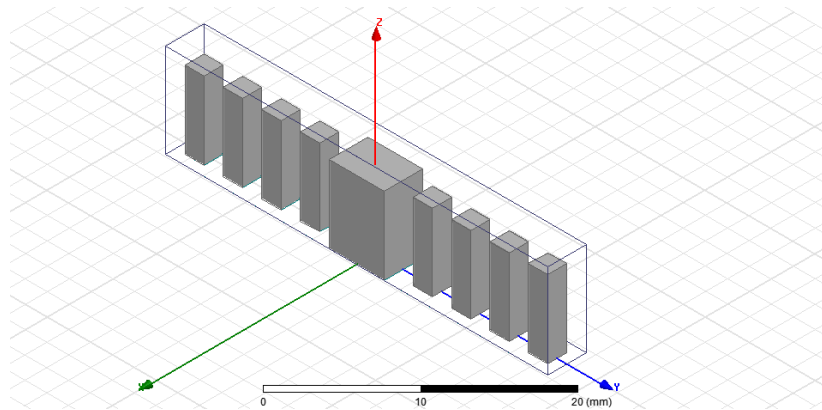


Figura 2.13: Modelo Celda Unitaria con Ridge a 10GHz

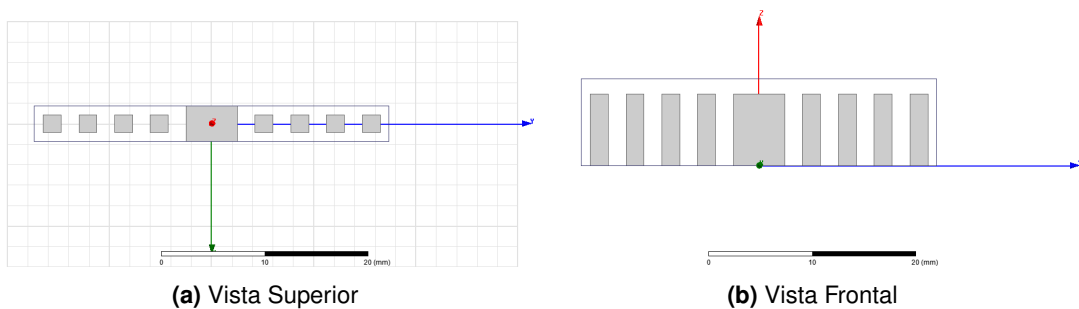


Figura 2.14: Celda Unitaria con Ridge a 10GHz

Al realizar la simulación de la celda unitaria con tira ridge en el software de simulación electromagnética, se puede observar que el bandgap se desplaza en frecuencia hacia la banda X. Además, se puede notar que hay un único modo propagándose por el espacio entre la tira ridge y la tapa superior de la guía.

Este resultado es de gran importancia para el diseño y simulación de la Ridge Gap Waveguide, ya que indica que la implementación de la tira ridge en la estructura permite la

propagación de una única onda en el bandgap deseado. Esto es fundamental para garantizar que la señal de interés viaje de manera eficiente y sin interferencias a través de la guía de onda.

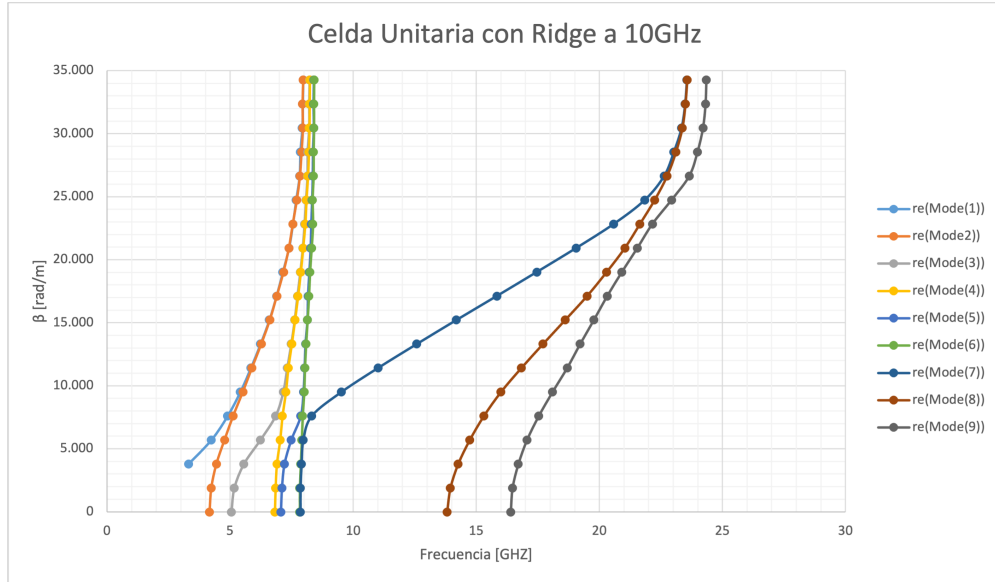


Figura 2.15: Diagrama de dispersión a 10GHz

Cabe destacar que la simulación de la celda unitaria con tira ridge es una etapa crítica en el proceso de diseño de la Ridge Gap Waveguide. Esto se debe a que permite verificar que la estructura funciona de acuerdo a lo esperado y que se cumple con los requisitos de la aplicación en cuestión.

Una vez que se evidenció el único modo propagándose sobre la tira ridge, se diseñó la Ridge Gap Waveguide (Figura 2.16) compuesta por varias celdas unitarias formando una estructura de pines que trabajan en la banda X.

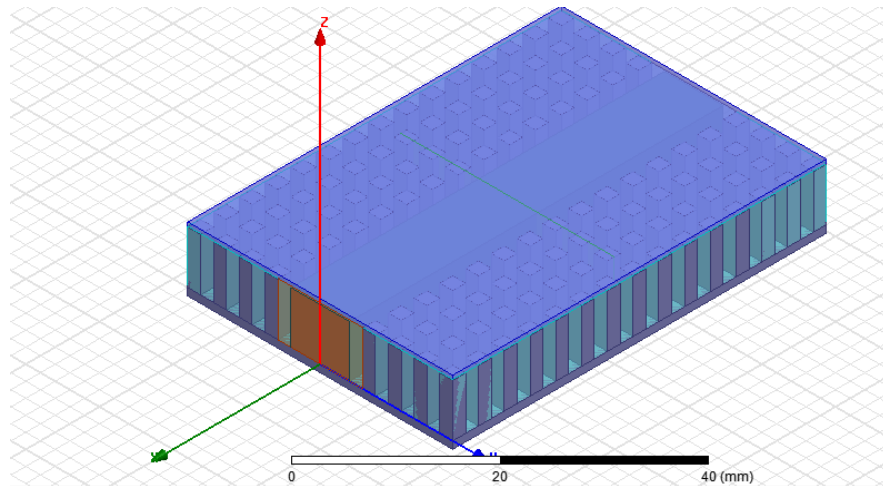


Figura 2.16: Ridge Gap Waveguide a 10GHz

La Figura 2.17 muestra la magnitud del campo eléctrico de la RGW operando en banda X. Se puede observar que dentro del bandgap, la onda está limitada entre la tira ridge y la tapa de la guía, mientras que para frecuencias superiores e inferiores al bandgap, la onda se propaga en todas las direcciones.

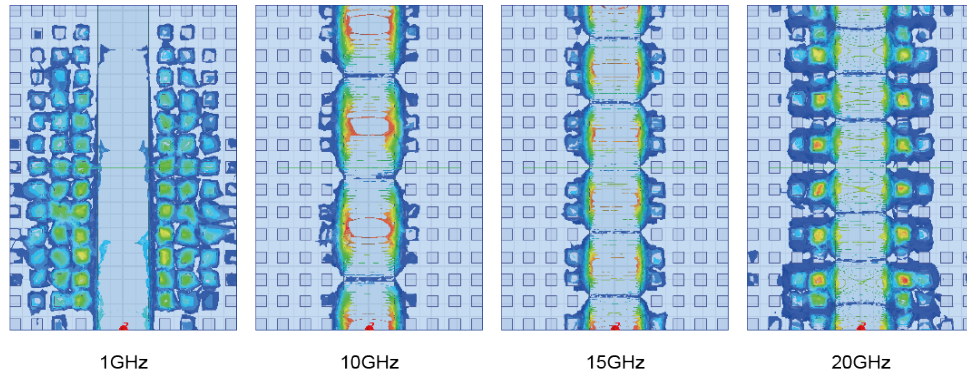


Figura 2.17: Magnitud del campo eléctrico para la RGW a 10GHz

El campo magnético transversal en la Figura 2.18 muestra cómo se distribuye el campo de forma constante en el gap de aire, y a medida que la onda se aleja de la tira ridge, su magnitud disminuye significativamente. En la posición de la primera columna de pines, la magnitud del campo magnético tiene un valor de -15 dB.

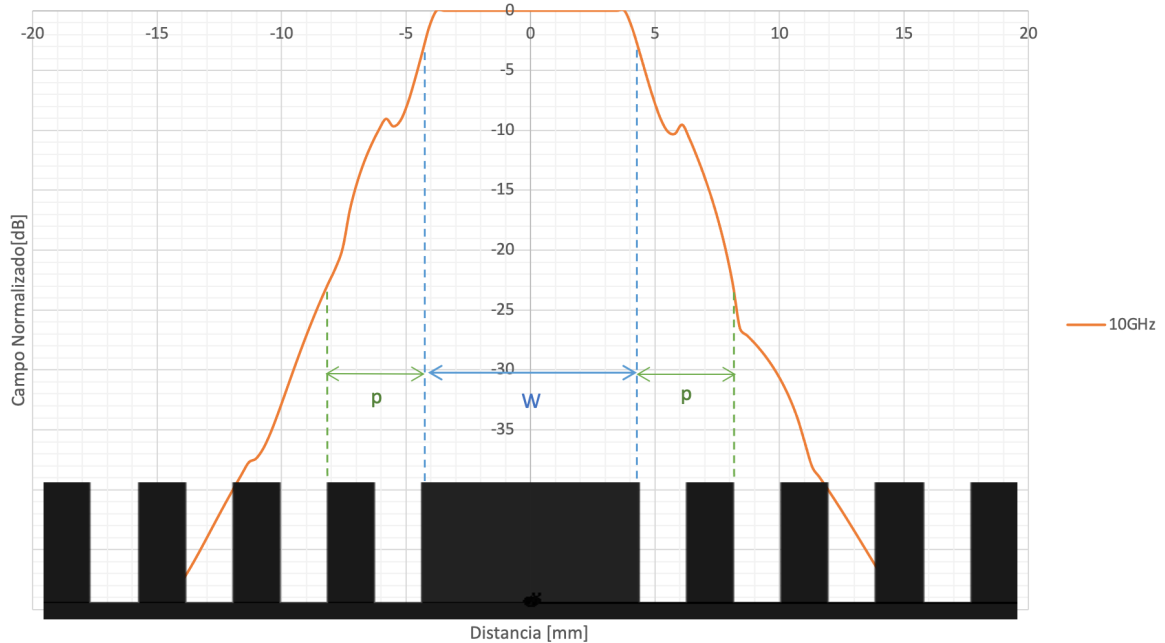


Figura 2.18: Magnitud del Campo Magnético Transversal

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

Es relevante mencionar que, a pesar de haber obtenido buenos resultados en el cálculo de las dimensiones de la Ridge Gap Waveguide, esto no implica que no se pueda mejorar su diseño y funcionalidad. Por lo tanto, es conveniente realizar optimizaciones en la RGW y ajustes en su geometría.

Uno de los cambios más importantes en la geometría de la RGW consiste en hacer que la tapa superior de la guía se asiente directamente sobre los pines, lo que facilita el proceso de fabricación. En la estructura original, la tapa debía apoyarse en unas paredes laterales que debían construirse de tal manera que no afectaran el funcionamiento de la guía.

Esta modificación en la estructura de la Ridge Gap Waveguide implica una disminución en la altura de la tira ridge, para permitir el paso de la onda. Este cambio tiene un impacto positivo en la guía, ya que su construcción se simplifica y se mejora la concentración de campo entre la tira ridge y la tapa, que ahora se asienta en los pines. Este cambio en la geometría se puede apreciar en la Figura 3.1b.

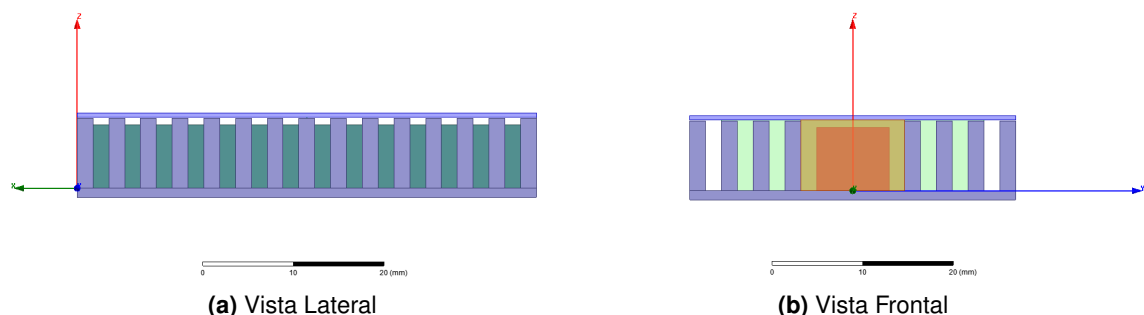


Figura 3.1: Ridge Gap Waveguide con Ridge Modificada a 10GHz

Con el fin de entender cómo las dimensiones de la tira ridge afectan el comportamiento de la guía, se llevó a cabo el análisis del campo magnético transversal para diferentes valores del espacio de aire formado entre la tira ridge y la tapa superior de la guía.

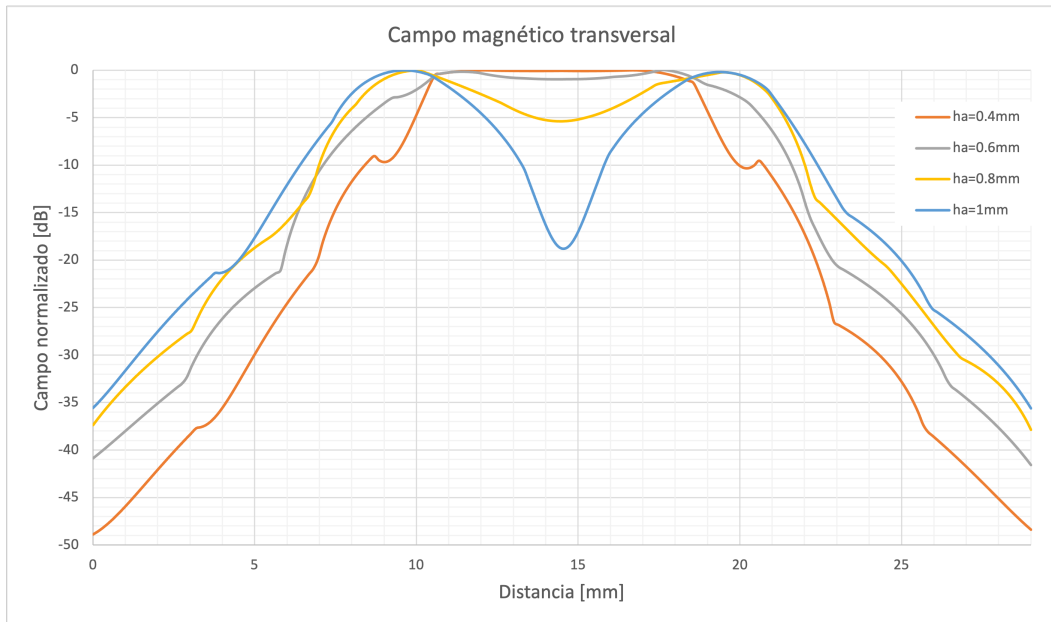


Figura 3.2: Campo H Transversal para diferentes alturas de aire

Mientras se estudia la Figura 3.2, se puede observar que cuando la altura del espacio (gap) de aire disminuye, el campo magnético se concentra sobre la tira ridge. Por otro lado, en casos donde las separaciones son mayores, el campo se extiende hacia los lados de la tira ridge y su atenuación es menor. Por lo tanto, en este caso una sola columna de pines no es suficiente para contener la onda.

En la Figura 3.3 se aprecia el efecto del espacio de aire. En particular, se puede observar que cuando la altura de aire es menor, el campo se confina de mejor manera al espacio entre la tira ridge y la tapa de la guía de onda.

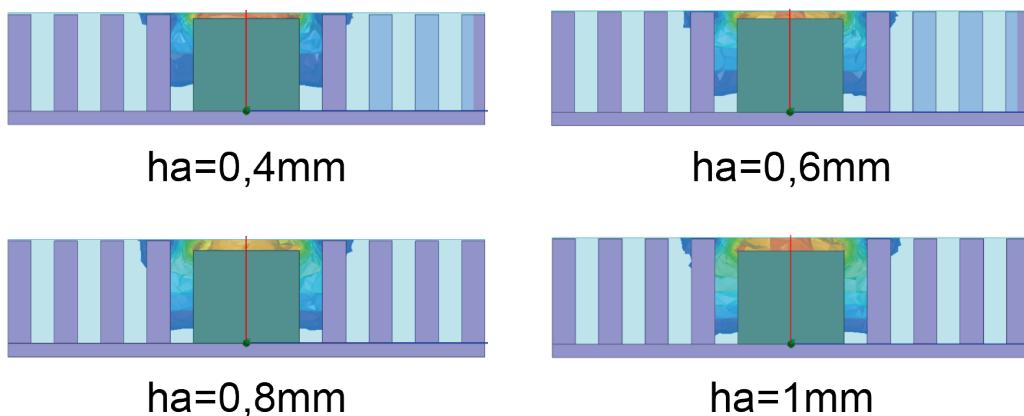


Figura 3.3: Campo H Transversal para diferentes alturas de aire

Con este análisis para optimizar la estructura, los valores de las dimensiones de la Ridge Gap Waveguide que se han mejorado son los siguientes:

$$d = 7mm$$

$$h = 0,4mm$$

$$p = 3,5mm$$

$$a = 1,75mm$$

Es importante recordar que el diseño fue creado específicamente para trabajar en la banda X, teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas anteriormente. Además, durante el proceso de diseño se han considerado diversas opciones y se han realizado múltiples pruebas para asegurar que el producto cumpla con las especificaciones propuestas. En resumen, el diseño ha sido sometido a un riguroso proceso de investigación y pruebas para garantizar su eficacia y fiabilidad en la banda X.

Después de calcular las dimensiones de la estructura y optimizarlas, se modeló la RGW, la cual consta de varias celdas unitarias periódicas en el eje X, formando una cama de pines. También se incluye una tira ridge continua en el centro que crea el camino por el cual la onda electromagnética viaja desde el puerto 1 hacia el puerto 2.

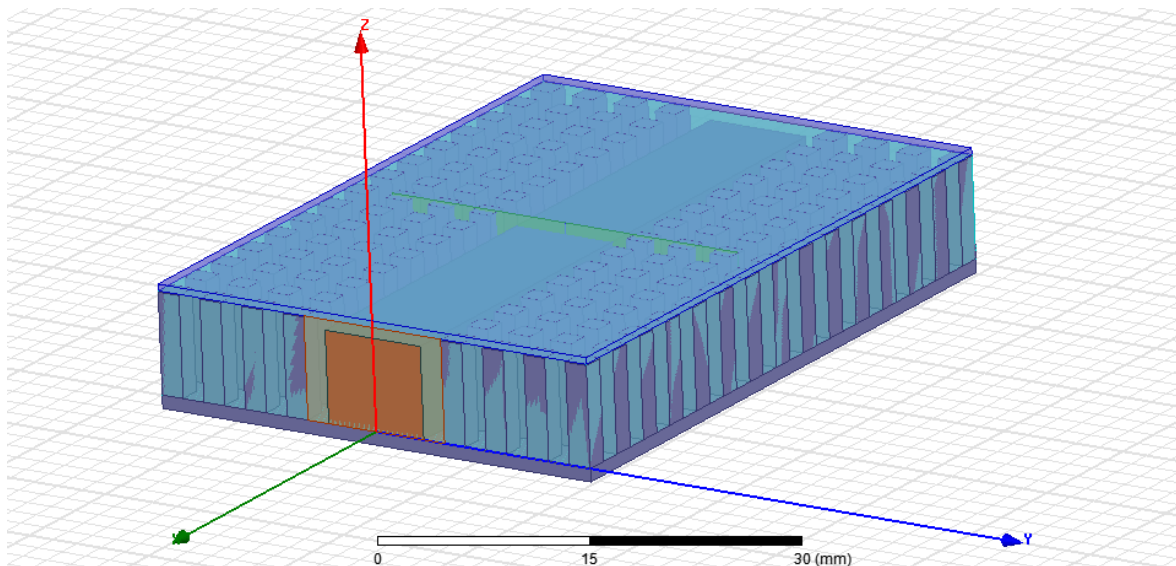


Figura 3.4: Ridge Gap Waveguide a 10GHz

Aunque la guía es un modelo ideal implementado con PEC, se llevaron a cabo simulaciones con diferentes materiales de construcción, como el aluminio y el cobre. Esto se hizo para

comprender mejor la influencia que los materiales no ideales tienen en el rendimiento de la guía de onda, en caso de que se desee implementar físicamente esta estructura.

Este análisis se realizó mediante el estudio de los parámetros de dispersión de la estructura. El objetivo fue determinar cómo se comporta en términos de transmisión y reflexión a la frecuencia de diseño según el material de construcción utilizado.

El parámetro S_{11} indica la cantidad de energía que se refleja en el puerto 1 cuando una señal es inyectada por el mismo. Es decir, este parámetro mide la cantidad de energía que se pierde debido a la reflexión en la Ridge Gap Waveguide.

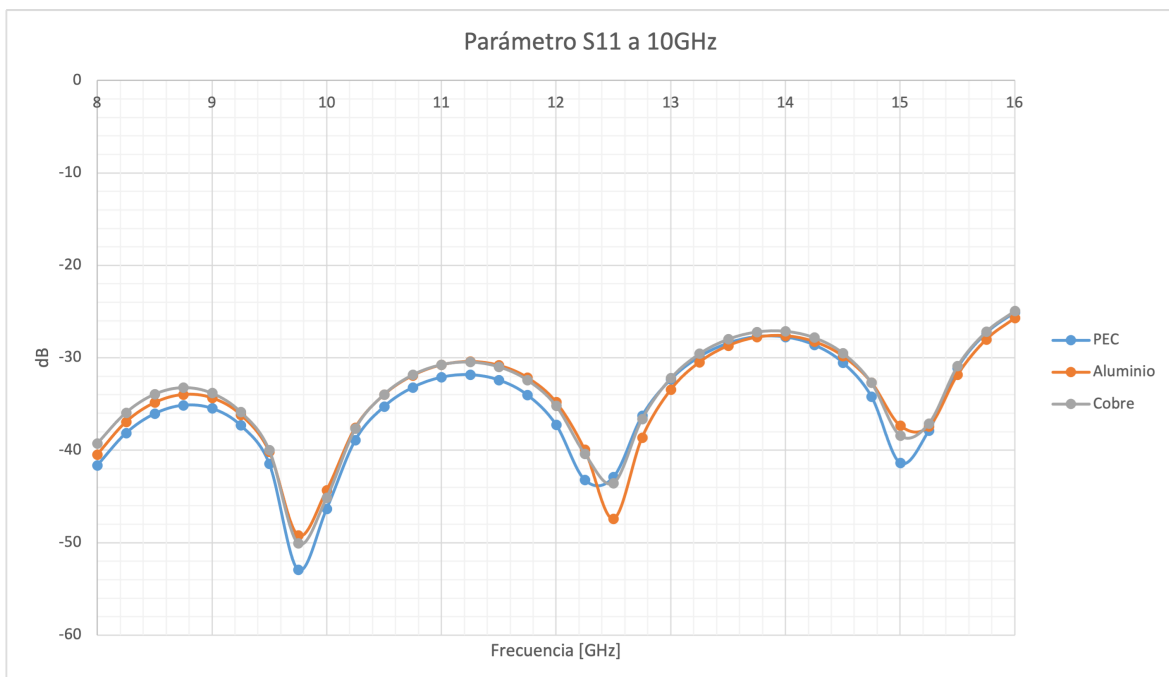


Figura 3.5: Parámetro S_{11} a 10GHz

Como se puede ver en la Figura 3.5, cuando la onda que se desea transmitir se encuentra dentro del rango de frecuencias correspondiente al bandgap formado por la estructura periódica, su valor de reflexión es inferior a -30dB. Esto sugiere que la señal que ingresa por el puerto 1 no se refleja.

Además, se puede observar que no hay una gran variación entre los valores obtenidos para diferentes materiales de construcción. Aunque, por definición, el PEC es ideal, la construcción con otros materiales no afectará drásticamente la reflexión de la guía ridge gap.

Por otro lado, el parámetro S_{21} de una matriz de scattering indica la cantidad de energía que se transmite del puerto 1 al puerto 2 al inyectarse una señal por el puerto 1. En resumen, este parámetro mide la eficiencia con la que la señal se transmite a través de la RGW.

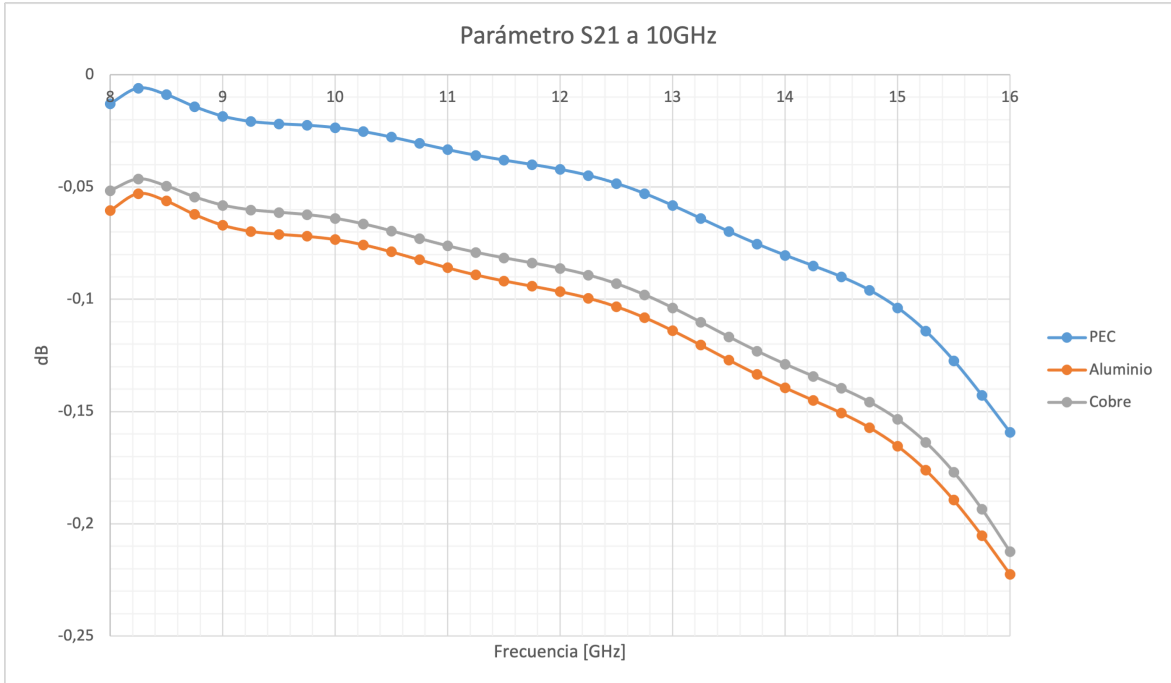


Figura 3.6: Parámetro S_{21} a 10GHz

En la Figura 3.6, se puede observar que en el bandgap diseñado, el parámetro S_{21} tiende a valores cercanos a 0 dB, lo que indica que casi toda la energía introducida por el puerto 1 se transmite al puerto 2.

Al igual que en el parámetro S_{11} , se observa que los valores correspondientes al parámetro S_{21} para cada material no presentan cambios significativos. Aunque el PEC se comporta como un conductor perfecto, los otros materiales tienen un rendimiento similar. Es importante tener en cuenta que la escala vertical de la Figura 3.6 está en decimales de dB.

3.2 CONCLUSIONES

- En conclusión, el proyecto se enfocó en el estudio y análisis de las propiedades de la guía de ondas Ridge Gap Waveguide, incluyendo la comprensión de las estructuras periódicas y la optimización de su geometría para obtener un mejor desempeño. Se realizaron análisis detallados de los parámetros de dispersión de la guía, lo que permitió evaluar el comportamiento de la guía en diferentes condiciones. Además, se identificaron aplicaciones potenciales de la tecnología Ridge Gap Waveguide en la transmisión y recepción de señales de microondas y milimétricas, así como en la integración de dispositivos electrónicos en la guía de onda. En general, los resultados

del proyecto sugieren que la tecnología Ridge Gap Waveguide tiene un gran potencial en una variedad de aplicaciones y puede ser una alternativa prometedora a otras tecnologías de guía de ondas existentes.

- Se encontró que la inclusión de estructuras periódicas en la guía tipo Ridge Gap Waveguide permite la creación de una banda de frecuencia prohibida, también llamada bandgap, lo que ayuda a evitar la propagación de modos no deseados en la guía de onda, mejorando su rendimiento y reduciendo las pérdidas.
- La geometría de la Ridge Gap Waveguide es crucial para su correcto funcionamiento, ya que cada dimensión cumple un propósito específico. Esta afirmación se pudo corroborar mediante las optimizaciones realizadas en la guía, pues se observó que la altura del gap de aire tiene un impacto importante en el confinamiento de la onda al pegar la tapa a los pines. Mientras más pequeño sea este valor, mejor será el confinamiento, lo que se traduce en una mejora en los parámetros de transmisión y reflexión de la guía.
- En cuanto al parámetro de reflexión, se ha observado que su valor es menor a -30dB en todo el bandgap diseñado, mientras que el parámetro de transmisión siempre se ha mantenido cerca de los 0dB. Por estas razones, se puede concluir que la tecnología Ridge Gap Waveguide es ideal para su uso en altas frecuencias debido a sus bajas pérdidas, incluso si se construye con materiales no ideales como aluminio y cobre.

3.3 RECOMENDACIONES

- Un área de investigación interesante es la optimización de la geometría de la Ridge Gap Waveguide. La mejora del rendimiento de la guía puede tener un impacto significativo en su aplicación en diversas áreas. Una forma de lograr esto podría ser a través de la exploración de diferentes formas de estructuras periódicas y la optimización de los parámetros de dispersión. Además, puede ser beneficioso explorar el efecto de diferentes materiales y sus propiedades en la guía. A medida que se desarrollan nuevas técnicas y herramientas, la mejora del rendimiento de la guía puede ser aún más significativa. Por lo tanto, continuar la investigación en esta área puede desbloquear nuevas posibilidades y aplicaciones para la Ridge Gap Waveguide.
- Realizar mediciones experimentales para validar los resultados de simulación obte-

nidos en el proyecto y ajustar los parámetros de la geometría de la guía según sea necesario. Esta etapa es crucial para evaluar la eficacia de la tecnología Ridge Gap Waveguide y garantizar que los resultados obtenidos en la simulación sean coherentes con la realidad. Es importante tener en cuenta que, aunque la simulación puede proporcionar una buena estimación del comportamiento de la guía, las mediciones experimentales son necesarias para validar la precisión de los resultados y ajustar cualquier parámetro que pueda afectar el rendimiento. Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo mediciones experimentales rigurosas y precisas para garantizar la eficacia y la viabilidad de la tecnología Ridge Gap Waveguide en diferentes aplicaciones.

- Se puede explorar cómo la tecnología de Ridge Gap Waveguide se puede integrar con otros dispositivos y sistemas electrónicos para mejorar el rendimiento y la eficiencia en aplicaciones específicas.
- Realizar análisis económicos y de mercado para evaluar la viabilidad de la tecnología Ridge Gap Waveguide en distintas áreas y usos.
- Para la implementación física de la guía de onda tipo Ridge Gap Waveguide, se recomienda utilizar técnicas de fabricación precisas, como el micromecanizado. Este proceso permitirá garantizar la uniformidad y precisión de las dimensiones de la guía, lo que se traducirá en una mejora en el rendimiento de la guía.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, 22 de nov. de 2011, 752 págs., Google-Books-ID: _YEbGAXCcAMC, ISBN: 978-0-470-63155-3.
- [2] «CABLE COAXIAL RG6 NEGRO C/M ELECTROCABLE | Kywi tienda en línea.» (3 de jul. de 2020), dirección: <https://kywitiendaenlinea.com/product/cable-coaxial-rg6-negro-c-m-electrocable/> (visitado 27-02-2023).
- [3] V. E. Boria Esbert, V. M. Rodrigo Peñarrocha y P. Soto Pacheco, *Líneas de transmisión*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2007, 320 págs., ISBN: 978-84-8363-134-8.
- [4] C. Suárez y L. Fernando, «Antenas multihaz con lente de Rotman para las bandas de microondas y milimétricas realizadas en diferentes tecnologías,» Accepted: 2015-12-14T06:43:18Z, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 14 de dic. de 2015. DOI: 10.4995/Thesis/10251/58779. dirección: <https://riunet.upv.es/handle/10251/58779>.
- [5] A. Bingham, Y. Zhao y D. Grischkowsky, «THz parallel plate photonic waveguides,» *Applied Physics Letters*, vol. 87, n.º 5, pág. 051 101, ago. de 2005, ISSN: 0003-6951, 1077-3118. DOI: 10.1063/1.1997273. dirección: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1997273> (visitado 25-02-2023).
- [6] H. Majeed, M. E. Kandel, K. Han et al., «Breast cancer diagnosis using spatial light interference microscopy,» *Journal of Biomedical Optics*, vol. 20, n.º 11, pág. 111 210, 20 de ago. de 2015, ISSN: 1083-3668. DOI: 10.1117/1.JBO.20.11.111210. dirección: <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.JBO.20.11.111210> (visitado 24-02-2023).
- [7] F. Farzin Nasab, S. A. Razavi Parizi y M. H. Ostovarzadeh, «A flat aperture antenna composed of a series fed h-plane horn array excited by a ridge gap waveguide horn,» *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 16, n.º 2, págs. 113-123,

feb. de 2022, ISSN: 1751-8725, 1751-8733. DOI: 10.1049/mia2.12223. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/mia2.12223> (visitado 25-02-2023).

- [8] M. A. Chaudhary, «Pseudoelliptic waveguide filters using non-resonating modes with folded-waveguide and ridge resonators,»
- [9] Yun Tao, Zhongxiang Shen y Gang Liu, «Efficient analysis of quadruple corner-cut ridged circular waveguide by hybrid mode-matching boundary-element method,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, n.º 3, págs. 1076-1079, mar. de 2009, ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2012588. dirección: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4787502/> (visitado 24-02-2023).
- [10] Y. Shi, J. Zhang, S. Zeng y M. Zhou, «Novel π -band millimeter-wave transition from microstrip line to groove gap waveguide for MMIC integration and antenna application,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, n.º 6, págs. 3172-3176, jun. de 2018, ISSN: 0018-926X, 1558-2221. DOI: 10.1109/TAP.2018.2819902. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8325511/> (visitado 24-02-2023).
- [11] A. U. Zaman, M. Alexanderson, T. Vukusic y P.-S. Kildal, «Gap Waveguide PMC Packaging for Improved Isolation of Circuit Components in High-Frequency Microwave Modules,» *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 4, n.º 1, págs. 16-25, ene. de 2014, ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2013.2271651. dirección: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6637079/> (visitado 25-02-2023).
- [12] E. Yablonovitch, «Photonic band-gap structures,» *JOSA B*, vol. 10, n.º 2, págs. 283-295, 1993.

5 ANEXOS