

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN EN BANDA X DE UNA AGRUPACIÓN DE
ANTENAS DE RANURAS CON SU RED DE ALIMENTACIÓN
UTILIZANDO TECNOLOGÍA SIW**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN EN BANDA X DE UNA ANTENA DE
RANURAS UTILIZANDO TECNOLOGÍA SIW**

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

CARLOS ANDRÉS VINUEZA ACOSTA

carlos.vinueza02@epn.edu.ec

DIRECTOR: DRA. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

veronica.navarro@epn.edu.ec

DMQ, ABRIL 2023.

CERTIFICACIONES

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



CARLOS ANDRÉS VINUEZA ACOSTA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CARLOS ANDRÉS VINUEZA ACOSTA, bajo mi supervisión.



DRA. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

CARLOS ANDRÉS VINUEZA ACOSTA

DRA. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

DEDICATORIA

A mis padres, Dalia y Paco; a mis abuelitos, Doris, Gonzalo (†), Laura y Miguel (†); a mi tío Carlos Stalin y a mis hermanas Melanie y Andrea... todos y cada uno han sembrado la semilla en mí para continuar siendo mejor cada día gracias a la fuerza más grande que existe, el amor de la familia. Ustedes son el motor de mi existencia. Este trabajo es por y para ustedes con mucho amor y esfuerzo.

Carlos Andrés Vinueza Acosta

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por la fortaleza y el refugio brindado para poder culminar una de las metas más importantes de mi vida. A mis padres, Dalia y Paco, por su inmensa paciencia y comprensión en este arduo camino lleno de altos y bajos en donde con sus sabios consejos me ayudaron a salir adelante y no rendirme en este hermoso proceso.

A mis abuelitos, Doris y Gonzalo, que al igual que mis padres han estado siempre a mi lado para apoyarme y también guiarme en mi camino desde que era un niño pequeño; mi amado Shalito partió de este mundo terrenal y ahora es mi ángel en el cielo, el que guía mis pasos y me da la fortaleza para superar cualquier obstáculo, gracias por todo mi viejito te amo y siempre te amaré por toda la eternidad. A mi tío Carlos por ser también unos de mis mayores ejemplos de disciplina y superación, por su incondicional apoyo durante toda mi vida. A mis hermanas Melanie y Andrea, por las locuras, los acolites y las desgracias que hemos vivido, somos imparables. A mis sobrinos que me han enseñado que no quiero tener hijos jaja, pero igual los quiero con mi corazón. Todo lo que hago es por ustedes, muchas gracias por ser la mejor familia del mundo, los amo.

A María José, quien también ha sido uno de mis mayores apoyos durante esta etapa de mi vida, gracias por tu motivación, palabras y el amor incondicional que me ha ayudado superarme cada día más.

A mis amigos de la Universidad, con quienes he pasado momentos únicos, tanto buenos y malos, sin necesidad de nombrarlos saben que en mí siempre contarán con un amigo dispuesto a ayudarlos. A la Poli por todo el sufrimiento, pero también todas las lindas experiencias y momentos que me llevo de este maravilloso lugar de estudio.

Un agradecimiento especial a la Dra. Diana Navarro, por su ayuda, el apoyo y los conocimientos brindados para poder terminar esta etapa. De igual manera a Bryan, mi compañero, por todo el trabajo que realizamos, además de las palabras y motivación que nos brindamos el uno al otro.

A mis mascotas (Harry Jr, Lucas, Max, Oso, Negra), porque estos seres llenos de amor y luz también son parte importante en mi familia, especialmente Negrita, la alegría del hogar; hasta el cielo un abrazo a Harry, mi hermano perruno que partió de este mundo después de 18 años llenos de amor, siempre estarás vivo en mi corazón.

Y a mí, por todas las veces que caí y supe levantarme para salir adelante para terminar de gran manera una de las mejores etapas de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1. Guía de onda.....	3
1.4.2. Modos de propagación.....	3
1.4.3. Guía de onda rectangular	4
1.4.4. Guía de onda integrada en sustrato – SIW (Substrate Integrated Waveguide)7	
1.4.4.1. Modos de propagación en SIW	8
1.4.4.2. Equivalencia entre guía convencional y SIW.....	8
1.4.4.3. Aplicaciones de la guía de onda SIW.....	10
1.4.5. Antena de ranuras	10
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Requerimientos de diseño.....	13
2.2 Diseño de la guía de onda rectangular.....	13
2.2.1. Dimensiones de la guía de onda rectangular	14
2.2.2. Simulación de la guía de onda rectangular	15
2.3 Diseño de la guía de onda integrada en sustrato (SIW).....	17
2.3.1. Dimensiones de la guía de onda integrada en sustrato SIW	17
2.3.2. Simulación de la guía de onda integrada en sustrato SIW	19
2.4 Diseño de antena de ranura con guía de onda convencional	21
2.4.1. Dimensiones de la antena de ranuras.....	21
2.4.2. Simulación de la antena de ranuras sobre guía convencional.....	22
2.5 Diseño de antena de ranuras en una guía de onda SIW.....	24
2.5.1. Dimensiones de la antena de ranuras sobre guía SIW.....	24
2.5.2. Simulación de la antena de ranuras sobre guía SIW.....	26

3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
3.1	Resultados	29
3.1.1.	Antena simulada con valores iniciales.....	29
3.1.2.	Antena simulada con valores optimizados (finales).....	30
3.1.3.	Análisis de tolerancia	34
3.1.3.1.	Variación de la longitud de las ranuras (<i>b</i>).....	34
3.1.3.2.	Variación del ancho de las ranuras (<i>c</i>)	35
3.1.3.3.	Variación de la separación entre ranuras y centro de la guía.....	36
3.1.3.4.	Variación de la distancia entre el borde final de la guía y el centro del último elemento	37
3.2	Conclusiones.....	39
3.3	Recomendaciones.....	40
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
5	ANEXOS.....	43
	ANEXO I. DATASHEET DEL SUSTRATO ROGERS 4003-C	43

RESUMEN

En este trabajo de titulación se propone llevar a cabo el diseño y posterior implementación de una antena de ranuras, en primera instancia desarrollada a partir de una guía de onda convencional, para después ser trasladada a una guía de onda con tecnología SIW (Substrate Integrated Wavewide).

Este trabajo está conformado por tres capítulos, los cuales se reparten de la siguiente forma:

En el Capítulo 1, se entrega un resumen con la teoría fundamental que tiene relación con la guía de onda convencional, la guía de onda con la tecnología SIW y las antenas de ranuras.

En el Capítulo 2, se detalla paso a paso el diseño de una guía de onda convencional y una guía de onda integrada en sustrato (SIW) con las dimensiones que se determinen conforme a la teoría y fórmulas planteadas en el Capítulo 1, en base a estos cálculos se integran las ranuras sobre dichas guías de onda para conformar la antena de ranuras para aplicaciones en banda X.

En el Capítulo 3, se analizan los resultados obtenidos y optimizados para la antena de ranuras antes mencionada utilizando un software de simulación electromagnético 3D. Para este fin, se analiza el parámetro S_{11} en la antena diseñada y se muestran los mejores resultados obtenidos en cuanto a adaptación y el rango de frecuencias en el que la antena funcionará de manera óptima (ancho de banda). Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones acerca del trabajo elaborado.

PALABRAS CLAVE: guía de onda, guía de onda integrada en sustrato (SIW), antena de ranuras, parámetros S, acoplamiento, ancho de banda.

ABSTRACT

For this degree work, it is proposed to carry out the design and subsequent implementation of a slot antenna, in the first instance developed from a conventional waveguide, to later be transferred to a waveguide with SIW technology (Substrate Integrated Wavewide).

This work is made up of three chapters, which are distributed as follows:

In Chapter 1, a summary is given with the fundamental theory that is related to the conventional waveguide, the waveguide with SIW technology and the slot antennas.

In Chapter 2, the design of a conventional waveguide and a substrate-integrated waveguide (SIW) is detailed step by step with the dimensions that are determined according to the theory and formulas proposed in Chapter 1, based on These calculations integrate the slots on said waveguides to form the slot antenna for X-band applications.

In Chapter 3, the results obtained and optimized for the aforementioned slot antenna using a 3D electromagnetic simulation software are analyzed. For this purpose, the parameter S_{11} in the designed antenna is analyzed and the best results obtained in terms of adaptation and the frequency range in which the antenna will work optimally (bandwidth) are shown. Finally, the conclusions and recommendations about the work carried out are presented.

KEY WORDS: waveguide, substrate integrated waveguide (SIW), slot antenna, S-parameters, coupling, bandwidth.

1 INTRODUCCIÓN

En los sistemas de comunicaciones se tienen distintos tipos de estructuras que son utilizadas para el guiado y la radiación de ondas electromagnéticas, entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

La tecnología de guía de onda presenta considerables ventajas relacionadas con el factor de calidad, un alto rendimiento y muy bajas pérdidas. Sin embargo, dicha tecnología produce componentes muy voluminosos que dificultan su producción en masa a un precio asequible; contrario a las tecnologías planares que son más económicas, fáciles de elaborar y con un tamaño compacto. Es por esto que surge la solución de crear estructuras híbridas compuestas de elementos planares y no planares, disminuyendo el coste y aumentando las prestaciones, dando paso así al concepto SIC's (Substrate Integrated Circuits). La guía de onda SIW (integrada en sustrato) es el SIC más conocido actualmente. [1] [2].

Las guías de onda que emplean tecnología SIW son estructuras planares que presentan características similares a una guía de onda convencional, pero está rellena con material dieléctrico, el cual presenta una altura y permitividad determinada. En la guía de onda de tecnología SIW, los bordes laterales se encuentran formados por postes metálicos separados por una determinada distancia, inmersos en material dieléctrico [3].

Una antena de ranura consiste en una superficie de metal con uno o más orificios (ranuras) recortados, dicha ranura radía ondas electromagnéticas de forma similar a una antena dipolo. La geometría de la antena y su frecuencia de trabajo determinan su patrón de radiación; generalmente son utilizadas en aplicaciones de microondas, antenas sectoriales para estaciones base celulares y, especialmente, en radares marinos. Las principales ventajas de las antenas de ranura implican su tamaño, simplicidad de diseño y adaptación a la producción en masa utilizando tecnologías de guía de onda [4].

Por consiguiente, en este trabajo de titulación se busca, en primera instancia, diseñar e implementar en un simulador electromagnético 3D una antena de ranuras utilizando una guía de onda convencional rellena de dieléctrico contemplando aplicaciones en la banda X de frecuencias (8.2 GHz – 12.4 GHz) y realizar su simulación. Posteriormente se empleará la tecnología SIW con las dimensiones adecuadas y se comprobará su correcto funcionamiento a la frecuencia dada. Para este fin, la frecuencia de operación será a 10

GHz y se utilizará el sustrato Rogers 4003-C con un espesor de 1.524 mm y una permitividad relativa de 3.5.

1.1 Objetivo general

El objetivo general del proyecto es:

Implementar en un simulador electromagnético 3D una antena de ranuras utilizando tecnología SIW (Substrate Integrated Waveguide) para aplicaciones en banda X.

1.2 Objetivos específicos

Para este proyecto, se plantea:

1. Describir los conceptos básicos relacionados con guía de onda convencional, la guía SIW (guía de onda integrada en sustrato) y las antenas de ranuras.
2. Estudiar los criterios necesarios para el diseño de una antena de ranuras empleando tecnología SIW (Substrate Integrated Waveguide).
3. Realizar el diseño y la simulación de la antena de ranuras en guía de onda convencional y en guía de onda SIW.
4. Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

1.3 Alcance

El presente proyecto consta de las siguientes fases:

A. Fase teórica.

Se revisan los conceptos y características más importantes de las antenas de ranuras con guía de ondas convencionales y de aquellas que integran sustratos. De igual manera, se presenta información más detallada sobre la tecnología SIW, así como el estudio del manejo del software electromagnético 3D.

B. Fase de diseño.

Se describen las principales características del sustrato Rogers 4003-C, se definen los criterios tomados en cuenta para el diseño para la guía de onda convencional y aquella que usa tecnología SIW para su operación en banda X, con frecuencia de trabajo central a 10 GHz. La antena constará de 7 ranuras con sus dimensiones calculadas de acuerdo con los diseños propuestos en las diferentes referencias bibliográficas revisadas.

C. Fase de análisis de resultados.

Una vez realizadas las simulaciones, se analizan los resultados obtenidos; en este caso, el parámetro evaluado es el S_{11} , el cual es utilizado para determinar la presencia o no de reflexiones en el puerto de acceso y el ancho de banda de la antena. Asimismo, se comprueba el correcto funcionamiento de la estructura implementada y se estudia su diagrama o patrón de radiación en los planos principales, para este caso, XZ y ZY.

Este proyecto no presenta un producto final demostrable.

1.4 Marco teórico

En esta sección se describen los conceptos relacionados con guías de onda convencionales (de placas paralelas y guía rectangular), sus modos de propagación, la guía de onda integrada en sustrato (SIW) y las antenas de ranuras.

1.4.1. Guía de onda

Se considera el desarrollo de la guía de onda como uno de los grandes hitos en la historia de la ingeniería de microondas, especialmente para la transmisión de energía con bajas pérdidas a alta frecuencia. Los primeros sistemas de radiofrecuencia y microondas eran basados en guías de onda, poseen una alta capacidad de manejo de potencia con bajas pérdidas, pero son caras y voluminosas (especialmente a bajas frecuencias) [1].

Las líneas de transmisión que constan más de un conductor soportan ondas electromagnéticas transversales (TEM), las cuales son caracterizadas por la ausencia de componentes de campo longitudinales. Las guías de ondas a menudo constan de un solo conductor, por lo que soportan ondas eléctricas transversales (TE) y/o ondas magnéticas transversales (TM), estas se caracterizan por la presencia tanto de campo magnético o eléctrico longitudinales [1] [5].

1.4.2. Modos de propagación

Se denomina modo de propagación a la forma en que se transmite la energía a través de la guía de onda. Existe un número infinito de modos de propagación con su respectiva frecuencia de corte (frecuencia a partir de la cual la señal comienza a propagarse). Conforme la frecuencia aumenta también se incrementa el número de modos [6].

La frecuencia de corte (f_c) es una de las características más importantes de los modos de propagación, se define como la frecuencia mínima a partir de la que un modo de propagación empieza a propagar su señal. Esta frecuencia depende de la morfología de la

guía de onda y su frecuencia de trabajo (f_0), esto puede dar paso a dos posibles tipos de transmisión: monomodo (un único modo) y multimodo (dos o más modos propagándose por la guía). El primer modo propagado dentro de la línea de transmisión es conocido como *modo fundamental*, mientras que al primer modo que no es propagado es denominado como *modo superior* [5] [6].

Para el análisis de la propagación de las ondas se deben establecer las condiciones de frontera que son determinados por los sistemas estudiados, la clasificación de los modos se describe a continuación [6] [7]:

Modo Transversal Eléctrico (TE): no posee componente de campo eléctrico en el sentido de la propagación.

Modo Transversal Magnético (TM): ausencia de componente de campo magnético en el sentido de la propagación.

Modo Transversal Electromagnético (TEM): no tiene campos magnéticos ni eléctricos en la dirección de la propagación.

Modos Híbridos: existe componentes de campo tanto magnético como eléctrico en el sentido de la propagación

La propagación de un modo se da a una frecuencia superior a la frecuencia de corte, si no se cumple esta condición, se considera un *modo evanescente*, esto significa que es rápidamente atenuado por el medio, de tal manera que se la totalidad de su energía se disipa antes de llegar a la recepción [7].

Para la guía de ondas rectangular hueca se tiene la propagación de los modos TM y TE, pero no de ondas TEM, ya que solo posee un conductor [1] [7].

1.4.3. Guía de onda rectangular

Este modelo de guía de onda estuvo entre los primeros tipos de líneas de transmisión que se utilizaron para transportar señales de microondas y todavía se usa ampliamente en la actualidad para diversas aplicaciones. Una amplia diversidad de componentes, tales como detectores, acopladores, aisladores y antenas de ranuras están disponibles para diferentes rangos de guías de onda estándar (entre 1 GHz y 220 GHz). A causa de la tendencia por la miniaturización y la integración, los sistemas modernos en su gran mayoría se construyen utilizando tecnologías planares como líneas microstrip y/o stripline en lugar de guía de onda. Sin embargo, estos elementos aún son necesarios en muchos casos, en

donde se pueden incluir los sistemas de alta potencia, las aplicaciones de ondas milimétricas y los sistemas satelitales [1] [8].

En comparación con las líneas coaxiales, se tienen ciertas ventajas como: en el dieléctrico no se presentan pérdidas, eliminación de las pérdidas de radiación gracias a su blindaje completo, una mayor capacidad de potencia y una construcción más sencilla. Entre sus desventajas se pueden mencionar: su instalación y operación es más complicada, deben ocupar apoyos para ser sujetadas debido a la dilatación térmica. Para conseguir la transmisión de la señal a una determinada frecuencia, las dimensiones mínimas de la guía de onda deben ser proporcionales a esta; esta proporcionalidad se encuentra en función de la forma de la guía y los modos de transmisión dentro de ella [9].

En la Figura 1.1 se representa una guía de onda rectangular con sus dimensiones, en su interior rellena un material de permitividad ϵ y permeabilidad μ . Para las guías de onda rectangulares se establece como convención estándar que el lado más largo de la guía de onda se ubique sobre el eje x, de modo que siempre se cumple que $a > b$ [1] [4].

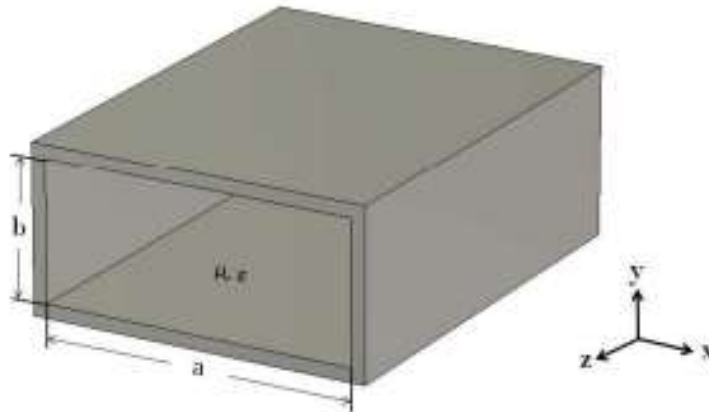


Figura 1.1. Geometría de una guía de onda rectangular [10].

En una guía de onda rectangular, para cada combinación de n y m , se tiene una frecuencia de corte definida por:

- Frecuencia de corte:

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

Ecuación 1.1. Frecuencia de corte para combinación de n y m .

$$f_c = \frac{c}{2a_0}$$

Ecuación 1.2. Frecuencia de corte en base al ancho de la guía.

- Longitud de onda en la guía:

$$\lambda_{g\ mn} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c\ mn}}{f_0}\right)^2}}$$

Ecuación 1.3. Longitud de onda en la guía rectangular (combinación de m y n).

En las guías de onda rectangulares el modo fundamental de propagación es el modo TE_{10} ya que se tiene como resultado la frecuencia más baja obtenida (frecuencia de corte). En la Figura 1.2 se presenta la atenuación que sufren los distintos modos de propagación en la guía de onda, verificando que el primer modo en aparecer es el modo TE_{10} [6].

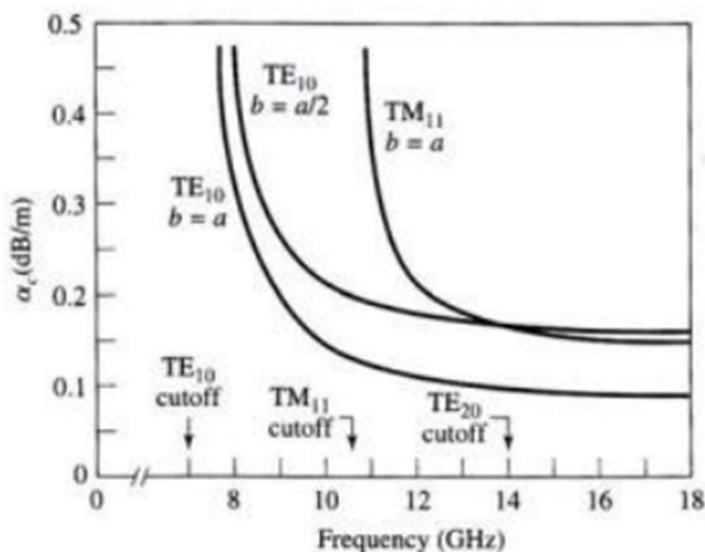


Figura 1.2. Atenuación de los modos principales de propagación [5].

Las dimensiones de las guías de onda rectangulares se encuentran preestablecidas en formatos estándar, cubren las frecuencias desde 1.7 GHz hasta 40 GHz. Se definen con el término “WR-#”, que significa “guía de onda rectangular” y con el número se indica la dimensión del ancho interior. La Tabla 1 presenta las dimensiones estándar para algunas guías de ondas rectangulares según sus rangos de frecuencia [5].

Tabla 1.1. Dimensiones de guías de onda rectangulares [5].

Banda de frecuencia	Estándar WR-#	Límites de frecuencia (GHz)	Dimensiones (mm)
Banda C	WR-137	5.85 a 8.20	34.8488 x 15.7988
Banda H	WR-112	7.05 a 10.0	28.4988 x 12.6238
Banda X	WR-90	8.2 a 12.4	22.86 x 10.16
Banda Ku	WR-62	12.4 a 18.0	15.7988 x 7.8994
Banda K	WR-42	18.0 a 26.5	10.668 x 4.318
Banda Q	WR-22	33.0 a 50.0	5.6896 x 2.8448
Banda U	WR-19	40.0 a 60.0	4.7752 x 2.3876

1.4.4. Guía de onda integrada en sustrato – SIW (Substrate Integrated Waveguide)

Es una estructura que está formada por dos filas de cilindros metálicos que se encuentran embebidos en un sustrato; permite una manera más fácil de integrar otros circuitos con líneas de transmisión planas, tales como microstrip o coplanares. Se basa en la tecnología de guías de onda rectangulares, pero su diferencia radica en que en lugar de ser implementada con un único conductor metálico se ocupa la tecnología microstrip. Es decir, se utiliza una estructura sobre sustrato, la cual consiste en dos láminas metálicas paralelas transversales, como se muestra en la Figura 1.3, usando una serie de postes para simular las paredes laterales de la guía de onda rectangular. [4] [11].

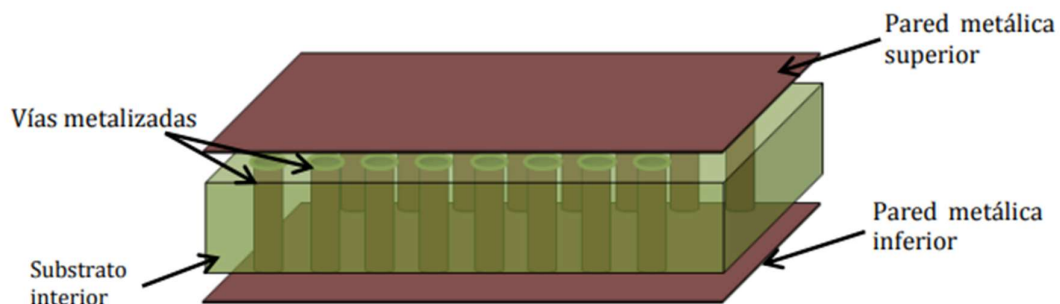


Figura 1.3. Elementos de una guía de onda SIW [4].

El formato típico de una guía de onda SIW se detalla en la Figura 1.4, en donde: a_{SIW} representa la separación entre centros de las vías, d es el diámetro de las vías, s es la distancia entre las vías contiguas y b representa el grosor o espesor del sustrato [11].

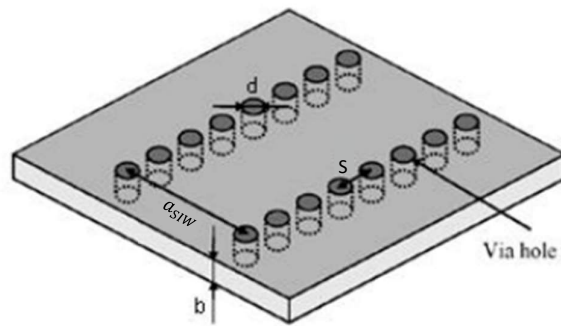


Figura 1.4. Geometría de una guía de onda SIW [11].

Esta tecnología fue creada con el propósito de trabajar a altas frecuencias, esto se debe a que cuando se usan frecuencias bajas se tendrá un tamaño de guía similar a las guías convencionales y también los mismos inconvenientes que esto representa. Entre sus ventajas se encuentran: un mejor acoplamiento que las líneas microstrip, un tamaño pequeño que hace su modelado más fácil así como su integración en superficies planas y no planas. Finalmente se puede mencionar que los componentes SIW tienen un coste menor y son más ligeros [7] [12].

1.4.4.1. Modos de propagación en SIW

Debido a su composición estructural, las guías SIW solo admite la propagación de modos TE y no puede guiar el modo TM. La guía SIW se puede ver como un caso especial de guía de onda rectangular que consiste en vías metalizadas en vez de paredes laterales; también se genera una corriente superficial cuando se establece un modo en un conductor. El modo TE_{mn} solo genera un subconjunto de los admitidos por la estructura, la separación existente entre las vías imposibilita la circulación de las corrientes longitudinales a través de las paredes laterales. Sin embargo, las corrientes que poseen sentido transversal son capaces de fluir a través de la guía de onda sin verse afectadas por dichas separaciones; es decir, cuando el flujo de corriente es paralelo a la dirección de los postes, estos no los cruzan y se mantendrá el modo. Para el caso del modo TE_{mn} con $n \neq 0$ y modo TM, se generan corrientes superficiales longitudinales y luego las rendijas transversales se cruzan con estas corrientes, esto genera una gran cantidad de pérdidas por radiación [7].

1.4.4.2. Equivalencia entre guía convencional y SIW

Al momento de diseñar una guía de onda SIW hay que tener en cuenta que su ancho no es el mismo que el de las guías de onda convencionales y debe ser obtenido mediante ecuaciones que describen la relación entre este tipo de guías de onda. La equivalencia entre ambas guías es presentada en la Figura 1.5 [13].

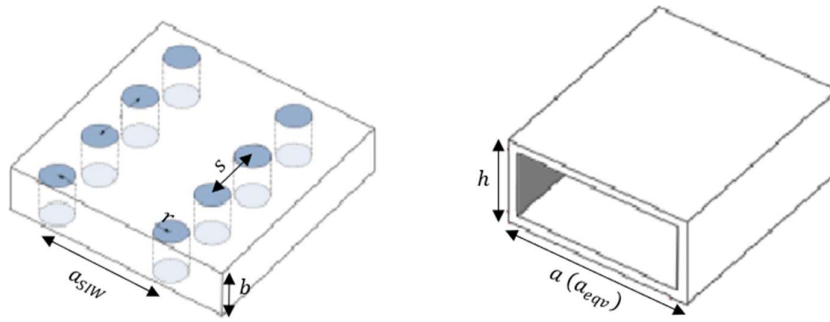


Figura 1.5. Guía SIW (izquierda) y guía de onda convencional (derecha) [13].

Para diseñar este tipo de estructuras, se debe establecer la equivalencia antes mencionada considerando las características del material dieléctrico, también debe determinarse una frecuencia de corte. Ocupando estos datos se hace uso de la expresión 1.2 para calcular el ancho de la guía rectangular que es correspondiente al de la guía integrada en sustrato [4] [13].

$$a_{eqv} = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 1.4. Ancho equivalente de la guía de onda rectangular.

Además de la amplitud de la guía equivalente, se deben determinar parámetros adicionales que conforman la guía SIW, como el radio "r" de los postes, la separación entre centros "s". Estos valores son obtenidos considerando que:

$$r < \frac{\lambda_g}{10}$$

Ecuación 1.5. Radio de los postes en la estructura SIW.

$$s \leq 4r$$

Ecuación 1.6. Separación entre centros de los postes.

Para este fin, es necesario realizar el cálculo de la longitud de onda en el dieléctrico λ y también de la longitud de onda en la guía λ_g [8].

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 1.7. Longitud de onda en el dieléctrico.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

Ecuación 1.8. Longitud de onda guiada.

Para la guía SIW, se calcula su ancho mediante la siguiente expresión:

$$a_{SIW} = a_{eqv} + 2r + \frac{(2r)^2}{0.95s}$$

Ecuación 1.9. Ancho de la guía SIW.

1.4.4.3. Aplicaciones de la guía de onda SIW

Componentes pasivos de microondas son los que más han sido desarrollados en tecnología SIW, ya que se puede reducir su tamaño en relación con las guías de onda convencionales además de disminuir las pérdidas respecto a la línea microstrip. Dentro de estos componentes, los filtros han recibido una mayor atención, también se han desarrollado acopladores direccionales y circuitos multi-puerto, conocidos comúnmente como circuladores [14].

Adicionalmente, la tecnología SIW ha sido utilizada para implementar componentes activos haciendo uso de su ventaja de fácil integración de los elementos con tecnologías planares. Entre estos componentes se pueden mencionar los osciladores, mezcladores y amplificadores [14].

1.4.5. Antena de ranuras

Una antena es un dispositivo transmisor o receptor que ha sido diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio. En este trabajo, se utiliza una guía de ondas rectangular (convencional y SIW) para realizar antenas de ranura, una ranura en una guía de onda posee un comportamiento parecido a un dipolo, dicho comportamiento dependerá de la ubicación de la ranura sobre la guía [15].

Debido a su simplicidad geométrica, alta eficiencia y un bajo peso, las antenas de guías de onda de ranuras son muy usadas en aplicaciones militares, naves espaciales, radares y sistemas de comunicaciones. La guía de onda es una línea de transmisión con bajas pérdidas, gracias a esto la señal se puede propagar hasta cada una de las ranuras y una parte de la señal se radía a través de ellas, las señales que son radiadas se suman en base a la colocación de las ranuras, consiguiendo una directividad significativa [15] [16].

En la Figura 1.6 se presenta las ranuras radiantes en una guía de onda con geometría rectangular.

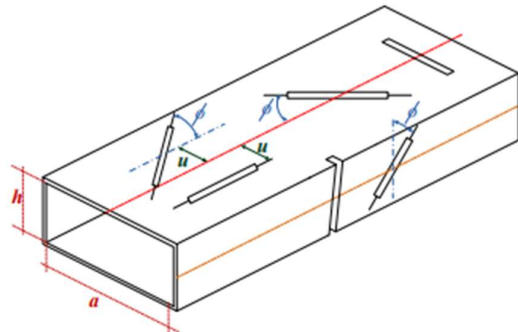


Figura 1.6. Antena de ranuras sobre guía rectangular [15].

Para antenas de este tipo, las ranuras deben ser colocadas a una distancia entre sí de $\frac{\lambda_g}{2}$, mientras que la última de ellas se posiciona a una distancia $\frac{\lambda_g}{4}$ del extremo de la guía. Este extremo actúa como un cortocircuito, provocando que la onda retorne y así creando una onda estacionaria, las ranuras se ubican en donde se encuentra los máximos de la onda [16]. Esto es conocido como alimentación mediante un modo resonante, este tipo de alimentación es la más común para las guías de onda de ranuras ya que únicamente es resonante a una frecuencia. Esta disposición se puede apreciar en la Figura 1.7.

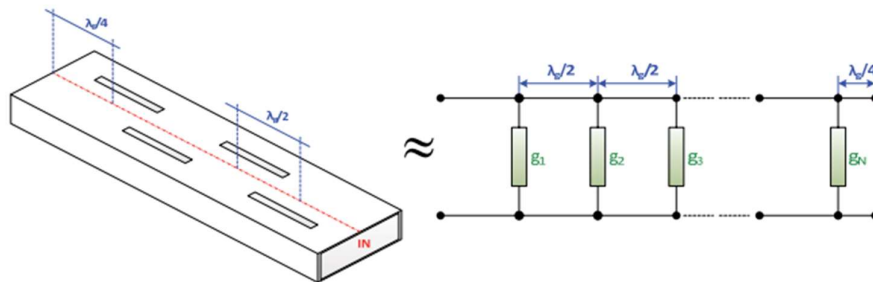


Figura 1.7. Antena de ranuras y su circuito equivalente [4].

Para cumplir con la adaptación de la antena, se deben cumplir ciertas equivalencias, las cuales son mostradas a continuación [4] [15]:

- La conductancia total o sumatoria de todas las ranuras.

$$g_t = \sum_{n=1}^N g_n$$

Ecuación 1.10. Conductancia total.

- La conductancia de cada ranura, esta es dada por el producto de una constante multiplicada por el cuadrado del nivel de excitación relativo que se busca en la ranura.

$$g_n = K a_n^2$$

Ecuación 1.11. Conductancia para cada ranura.

- El producto de la constante por el sumatorio del cuadrado de los niveles de excitación de cada ranura debe ser igual a 1.

$$K \sum_{n=1}^N a_n^2 = 1$$

Ecuación 1.12. Equivalencia del nivel de excitación de las ranuras.

Las dimensiones de las ranuras vienen dadas de la siguiente manera: b representa el largo de la ranura y c su ancho. Considerando una guía de onda rellena de dieléctrico, se tienen las siguientes expresiones [15]:

$$b = \frac{\lambda_g}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}$$

Ecuación 1.13. Longitud de ranura.

$$c \leq \frac{b}{10}$$

Ecuación 1.14. Ancho de ranura.

2 METODOLOGÍA

Para este trabajo se plantea el diseño e implementación de una antena de ranuras, en primera instancia sobre una guía de ondas rectangular convencional rellena de dieléctrico para después trasladar el diseño a una guía de onda integrada en sustrato (SIW).

A fin de analizar el comportamiento de las antenas diseñadas, se ocupa el software electromagnético 3D ANSYS HFSS para su modelamiento y posterior análisis, se debe recalcar que en este tipo de estructuras se tiene un único puerto de alimentación, por lo que el parámetro de análisis es el S_{11} .

Para llegar al diseño de las antenas de ranuras se ocupan las fórmulas presentadas en el marco teórico, para un mejor desempeño se utiliza un script realizado en Matlab para obtener los resultados de dichas ecuaciones. En cuanto a la guía SIW, se debe analizar y encontrar el radio de los postes metálicos y la distancia que los separa para lograr que esta sea equivalente a una guía de onda estándar rellena de dieléctrico.

2.1 Requerimientos de diseño

Tomando en cuenta los requerimientos del proyecto, la antena de ranuras sobre guía de onda SIW debe cumplir con los siguientes criterios: tener frecuencia de operación dentro de la banda X (8.2 – 12.4 GHz) y usar el sustrato Rogers 4003-C (Ver Anexo 1).

Primeramente, se realizará el diseño de la guía rectangular para luego seguir con la guía integrada en sustrato SIW, sobre las cuales se implementarán las antenas de ranuras. Posteriormente, se procede al análisis del tamaño de las ranuras (largo y ancho) para su correcto funcionamiento.

2.2 Diseño de la guía de onda rectangular

La primera estructura diseñada e implementada en el software de simulación electromagnético 3D ANSYS HFSS es la guía rectangular, el sustrato utilizado para rellenar esta guía es el Rogers 4003-C.

Las variables de diseño consideradas para la guía de onda rectangular se aprecian en la Figura 2.1, en donde: (a_d) es el ancho de la guía rellena del dieléctrico, (h) representa el grosor (altura) del dieléctrico y (L) es el largo de la guía.

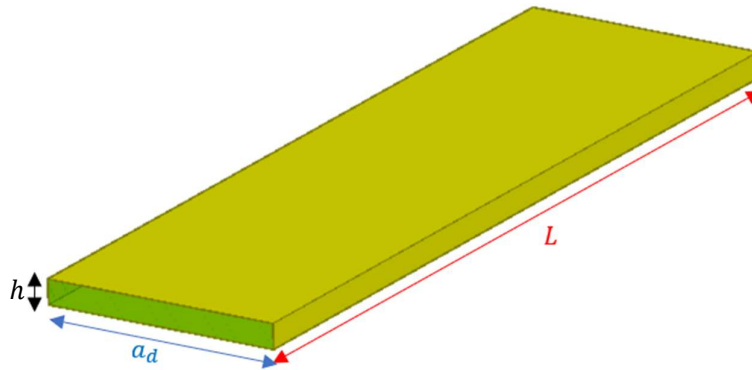


Figura 2.1. Variables de la guía de onda rectangular.

2.2.1. Dimensiones de la guía de onda rectangular

Para realizar el diseño de la guía rectangular y obtener sus dimensiones, se procede a realizar el escalamiento de una guía de onda con su interior relleno de aire a una que se encuentra rellena con dieléctrico, tomando como referencia las dimensiones estándar de una guía de onda que trabaja en un rango 6.8 GHz a 10 GHz [17].

Se toma en cuenta el ancho de la guía rellena de aire ($a_0 = 28.448 \text{ mm}$), en primer lugar, se obtiene su frecuencia de corte f_c ocupando la ecuación 1.2. A continuación se detallan los cálculos realizados.

$$f_c = \frac{c}{2a_0}$$

$$f_c = \frac{3 * 10^8}{2 * 28.449 \text{ mm}}$$

$$f_c = 5.27 \text{ GHz}$$

Ahora, se ocupa la ecuación 2.1 y se reemplazan los valores del ancho de la guía rellena de aire (a_0) y el de la permitividad del sustrato (ϵ_r) para realizar el cálculo correspondiente el ancho de la guía rectangular rellena de dieléctrico (a_d).

$$\frac{a_d}{a_0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$a_d = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} * a_0$$

$$a_d = \frac{1}{\sqrt{3.55}} * 28.449 \text{ mm}$$

$$a_d = 15.1 \text{ mm}$$

En la Tabla 2.1 se detallan los valores para la guía rellena de dieléctrico.

Tabla 2.1. Variables de diseño, guía de onda rellena de dieléctrico.

Variable	Valor
Ancho guía rellena de aire (a_0)	28.449 mm
Frecuencia de corte (f_c)	5.27 GHz
Permitividad (ϵ_r)	3.55
Grosor del dieléctrico (b)	1.524 mm
Ancho guía rellena de dieléctrico (a_d)	15.1 mm
Longitud de la guía (L)	60 mm

2.2.2. Simulación de la guía de onda rectangular

A partir de los valores obtenidos en el apartado 2.1.1 se procede a la simulación de la estructura, en la Figura 2.2 se presenta el reporte correspondiente a las pérdidas de retorno (parámetro S_{11}). En el caso de la Figura 2.3 se muestran las pérdidas de inserción (parámetro S_{21}), mismas que a partir de la frecuencia de corte se estabilizan cerca de los 0 dB.

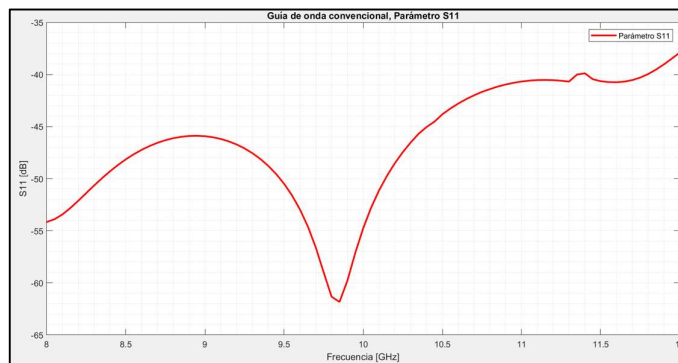


Figura 2.2. Reporte del parámetro S_{11} .

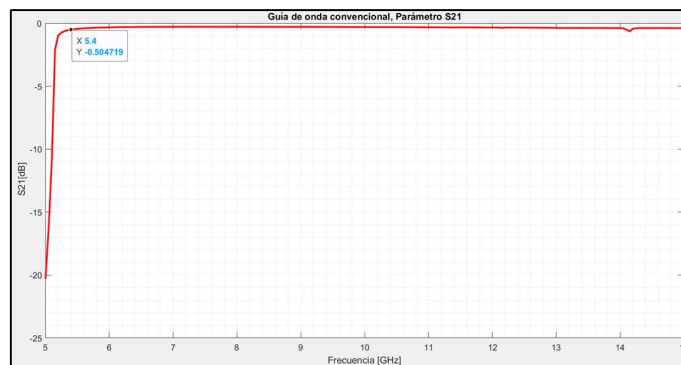


Figura 2.3. Reporte del parámetro S_{21} .

En la Figura 2.4 se presenta la sección transversal de la guía de onda diseñada, se aprecia la distribución del campo eléctrico siendo mínimo en sus laterales y su valor máximo ubicado en el centro de la guía.

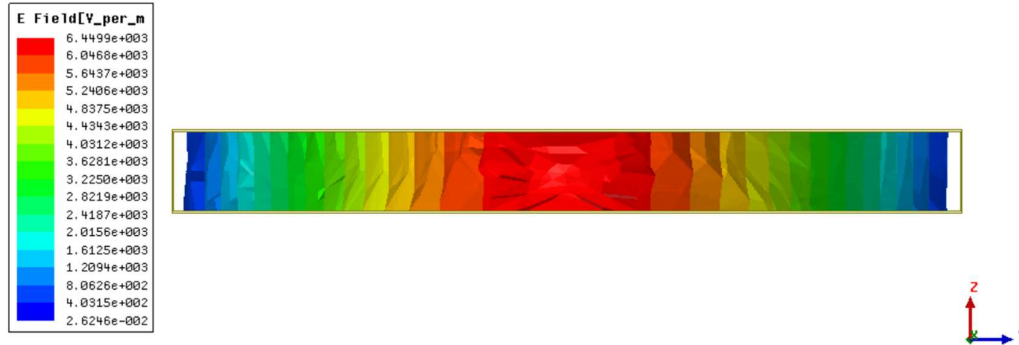


Figura 2.4. Campo eléctrico distribuido en magnitud (vista frontal).

En la Figura 2.5. se observa que el campo eléctrico en su totalidad se encuentra dentro de las paredes conductoras. Finalmente, la Figura 2.6 muestra el vector del campo magnético, en donde se aprecia que la perpendicularidad a la dirección de propagación se mantiene.

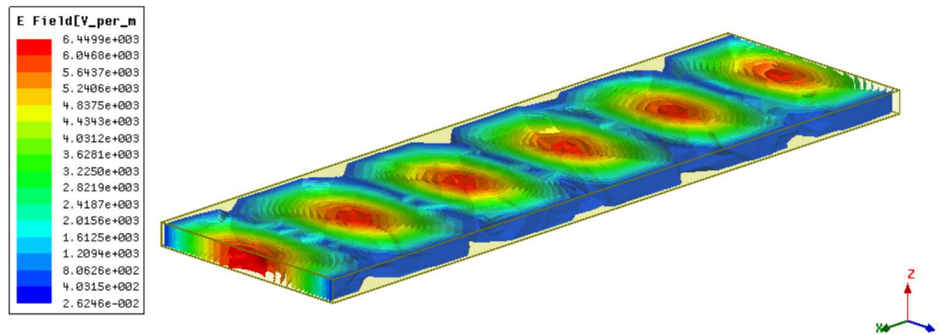


Figura 2.5. Campo eléctrico confinado dentro de la guía de onda rectangular.

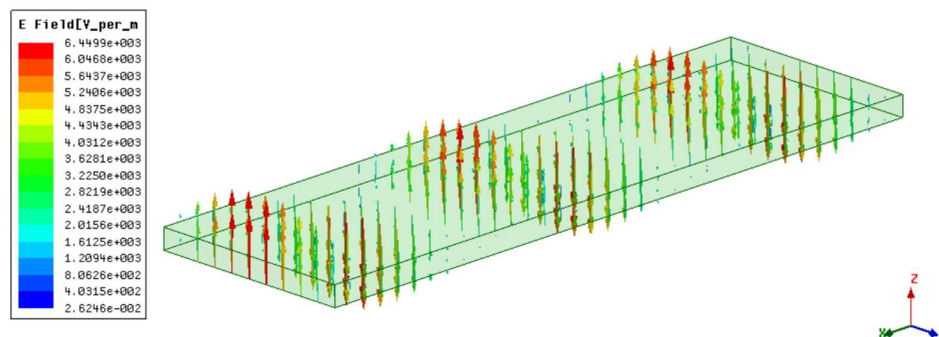


Figura 2.6. Representación del campo eléctrico en forma vectorial.

2.3 Diseño de la guía de onda integrada en sustrato (SIW)

En cuanto a la guía SIW, se requieren los siguientes parámetros: (a_{eqv}) ancho de la guía equivalente, (s) separación entre el centro de los postes, (r) el radio de los postes y (a_{SIW}) el ancho de la guía SIW. De igual manera, se requiere la frecuencia de corte calculada anteriormente ($f_c = 5.27 \text{ GHz}$).

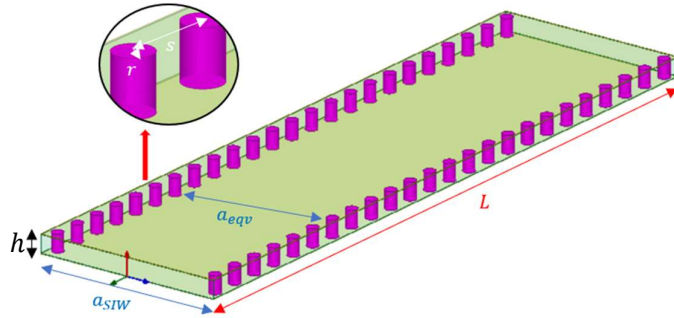


Figura 2.7. Elementos de una guía SIW.

2.3.1. Dimensiones de la guía de onda integrada en sustrato SIW

La frecuencia de corte calculada contribuye a la estimación de la frecuencia mínima de trabajo, ocupando la expresión 1.4 se hace el cálculo del ancho de la guía rectangular equivalente a la guía SIW.

$$a_{eqv} = \frac{c}{2 * f_c * \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$a_{eqv} = \frac{3 * 10^8}{2 * 5.27 \text{ GHz} * \sqrt{3.55}}$$

$$a_{eqv} = 15.1 \text{ mm}$$

Para seguir con el cálculo del radio de los postes y la separación entre el centro de cada uno de ellos se deben considerar las ecuaciones 1.5 y 1.6, pero previamente se requiere realizar el cálculo de la longitud de onda en el dieléctrico (λ) y la longitud de onda en la guía (λ_g) con las ecuaciones 1.7 y 1.8, respectivamente.

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{10 \text{ GHz} * \sqrt{3.55}}$$

$$\lambda = 15.92 \text{ mm}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \frac{15.92 \text{ mm}}{\sqrt{1 - \left(\frac{5.27 \text{ GHz}}{10 \text{ GHz}}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \mathbf{18.74 \text{ mm}}$$

Una vez obtenidos estos valores se puede realizar el cálculo del radio (r) y de la separación entre los centros de los postes (s) como se mencionó en el párrafo anterior.

$$2r < \frac{18.74 \text{ mm}}{10}$$

$$r < \mathbf{0.937 \text{ mm}}$$

...

$$s \leq 4 * 0.937 \text{ mm}$$

$$s \leq \mathbf{3.748 \text{ mm}}$$

Los cálculos realizados sirven como limitaciones para la fabricación de la guía SIW, por lo que para este proyecto se consideran los siguientes valores: $r = 0.5 \text{ mm}$ y $s = 2.5 \text{ mm}$, los cuales cumplen las condiciones.

El ancho o amplitud de la guía de onda integrada en sustrato se obtiene con la ecuación 1.9.

$$a_{SIW} = a_{eqv} + 2r + \frac{(2r)^2}{0.95s}$$

$$a_{SIW} = 15.1 \text{ mm} + 2(0.5 \text{ mm}) + \frac{(2 * 0.5 \text{ mm})^2}{0.95 * 2.5 \text{ mm}}$$

$$a_{SIW} = \mathbf{16.52 \text{ mm}}$$

En la Tabla 2.2 se detallan los valores considerados para el diseño de la guía de onda integrada en sustrato (SIW).

Tabla 2.2. Variables para la guía de onda SIW.

Variable	Valor
Frecuencia de trabajo (f)	10 GHz
Ancho de la guía equivalente (a_{eqv})	15.1 mm
Ancho de la guía SIW (a_{SIW})	16.52 mm
Radio de los postes (r)	0.5 mm
Separación entre centro de postes (s)	2.5 mm

2.3.2. Simulación de la guía de onda integrada en sustrato SIW

Teniendo ya implementada la guía SIW con los parámetros obtenidos, se procede a verificar que el funcionamiento de esta guía de onda sea similar al de la guía de onda rectangular. En la Figura 2.8 se observa el parámetro S_{11} , se verifica que las pérdidas de retorno se encuentran en un nivel menor a -20dB. En la Figura 2.9 se presenta el reporte de las pérdidas de inserción (S_{21}), alrededor de 0 dB al superar la frecuencia de corte.

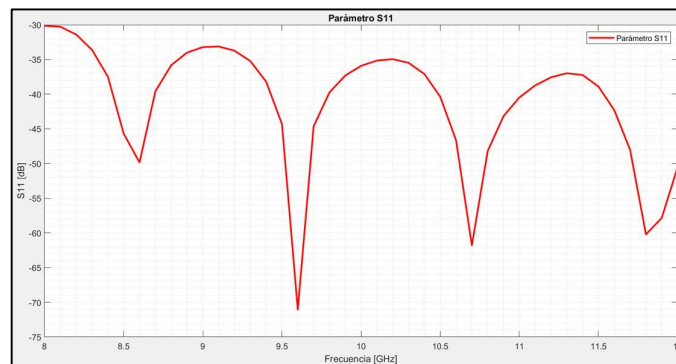


Figura 2.8. Reporte del parámetro S_{11} para la guía SIW.

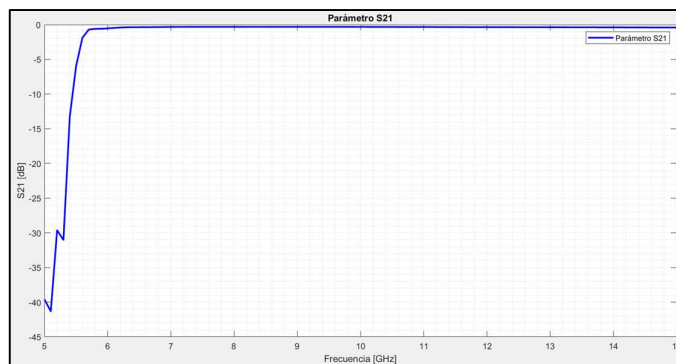


Figura 2.9. Reporte del parámetro S_{21} para la guía SIW.

En la Figura 2.10 se presenta la sección transversal de la guía SIW diseñada, se aprecia cómo el campo eléctrico se distribuye, siendo mínimo en sus laterales y su valor máximo ubicado en el centro de la guía.

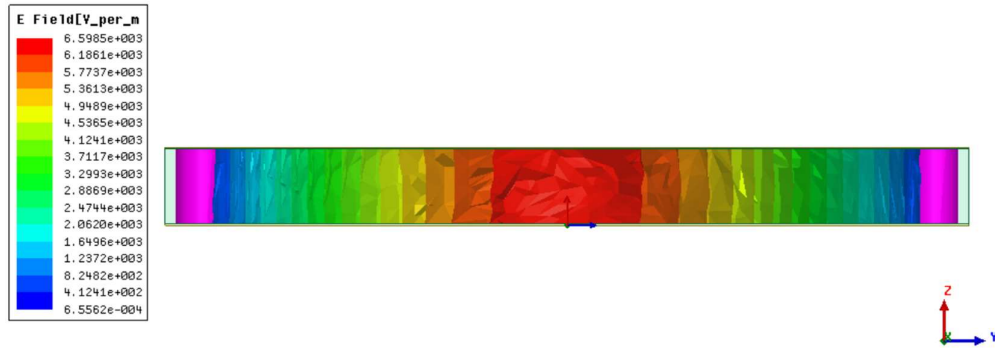


Figura 2.10. Campo eléctrico distribuido en la guía de onda SIW (vista frontal).

Tal como lo presentado en la guía rectangular, en la Figura 2.11 se aprecia como se da la confinación del campo eléctrico entre los postes metálicos que representan las paredes laterales de la guía de onda. El vector de campo magnético se observa en la Figura 2.12.

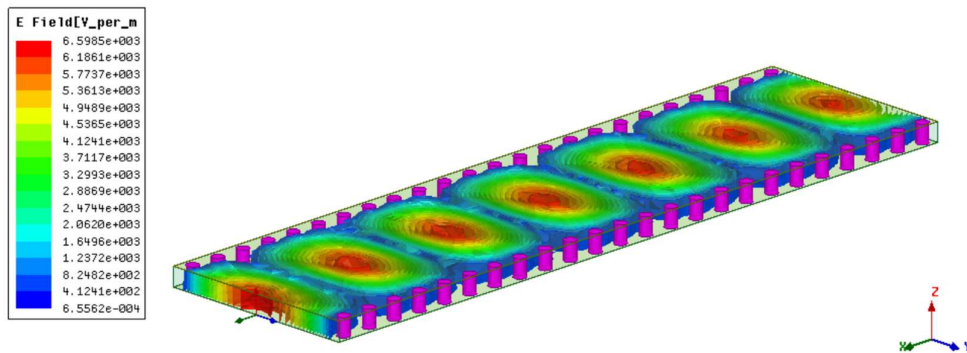


Figura 2.11. Campo eléctrico confinado entre las filas de postes de la guía SIW.

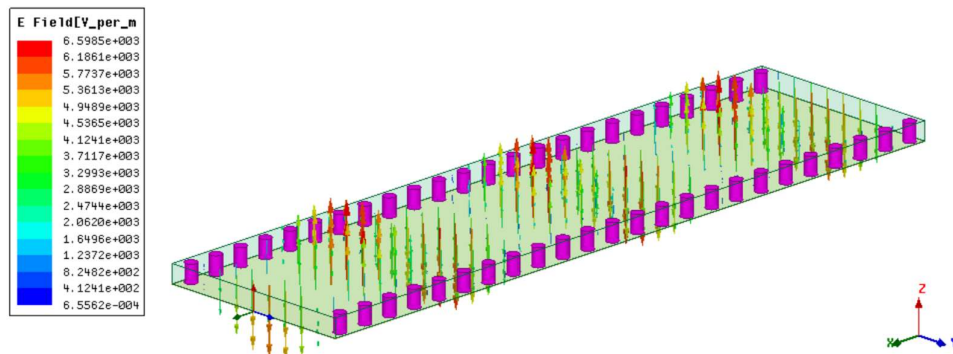


Figura 2.12. Representación del vector campo eléctrico en la guía SIW.

2.4 Diseño de antena de ranura con guía de onda convencional

El objetivo en esta sección es diseñar una antena de ranuras (7 slots) sobre la guía rectangular implementada en el apartado 2.2. Se debe recalcar que, para esta guía de onda, se realizó el escalamiento a partir de una guía de onda convencional que trabaja en el rango de frecuencias de 6.8 GHz a 10 GHz [12]. En la Figura 2.13 se presentan los elementos que conforman esta estructura.

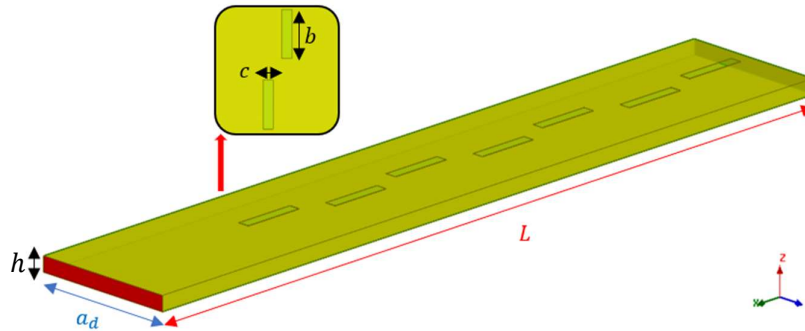


Figura 2.13. Elementos de la antena de ranura sobre guía rectangular.

2.4.1. Dimensiones de la antena de ranuras

Como se mencionó, la antena de ranuras se implementa a partir de la guía de onda rectangular diseñada en este trabajo, es decir, se ocupan el mismo ancho de guía (a_d) y la altura del dieléctrico (h), la longitud de la guía de onda es directamente afectada por el largo de las ranuras, tomando en cuenta que la última ranura debe tener su centro ubicado a una distancia de $\frac{\lambda_g}{4}$ del borde de la guía y la separación entre ranuras corresponde a $\frac{\lambda_g}{2}$. El largo (b) y ancho (c) de las ranuras se calculan con las ecuaciones 1.3 y 1.4 respectivamente, en función de λ_g calculada con la expresión 1.8.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \frac{15.92 \text{ mm}}{\sqrt{1 - \left(\frac{5.27 \text{ GHz}}{10 \text{ GHz}}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \mathbf{18.74 \text{ mm}}$$

$$b = \frac{\lambda_g}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}$$

$$b = \frac{18.74 \text{ mm}}{\sqrt{2(3.55 + 1)}}$$

$$b = 6.212 \text{ mm}$$

$$c \leq \frac{b}{2}$$

$$c \leq \frac{6.21}{10}$$

$$c \leq 0.621 \text{ mm}$$

En la Tabla 2.3 se detallan los parámetros considerados para el diseño de la antena de ranuras sobre la guía de onda rectangular.

Tabla 2.3. Criterios considerados para la antena de ranuras en guía de onda rectangular.

Variable	Valor
Frecuencia de trabajo (f)	10 GHz
Ancho de la guía rectangular (a_d)	15.1 mm
Ancho de la ranura (c)	0.63 mm
Longitud de la ranura (b)	6.1 mm
Separación entre ranuras y el centro horizontal de la guía (sep)	1 mm

2.4.2. Simulación de la antena de ranuras sobre guía convencional

En la Figura 2.14 se observa el reporte del parámetro S_{11} que representa el nivel de adaptación y las pérdidas de retorno en la antena de ranuras.

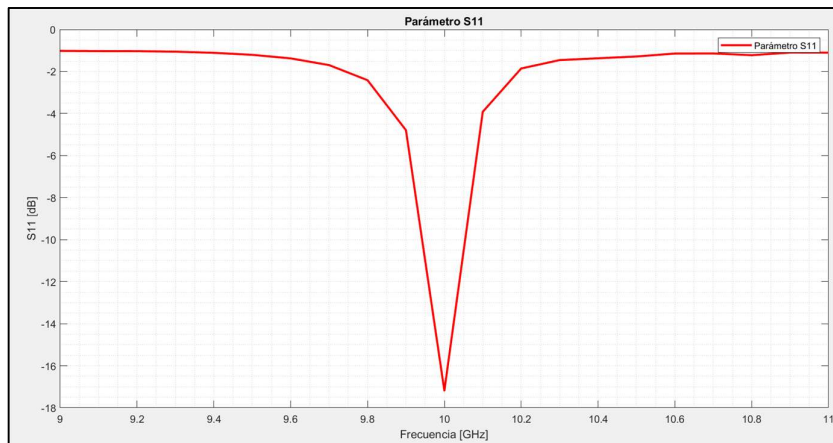


Figura 2.14. Reporte del parámetro S_{11} en la antena de ranuras.

Es importante analizar el diagrama de radiación para la antena de ranuras, este representa gráficamente las propiedades de direccionalidad de la antena en el espacio. Se recalca que no se tiene la misma radiación en todas las direcciones y la información para analizar se obtiene del corte del diagrama en los planos principales, en este caso, plano XZ y plano YZ.

En la Figura 2.15 se presenta el reporte de campo lejano, los parámetros a analizar en este caso son la ganancia y la directividad de la antena. Para esta estructura, se tiene una directividad de alrededor de 10 dB, lo cual representa una buena potencia radiada por la antena.

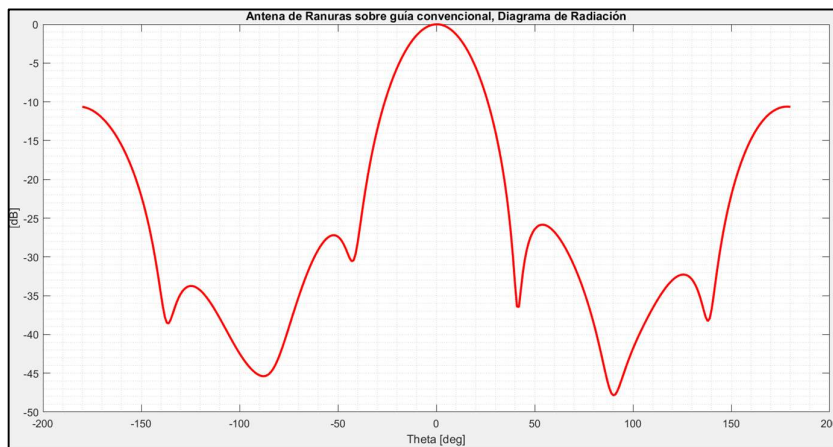


Figura 2.15. Diagrama de radiación normalizado en el plano XZ.

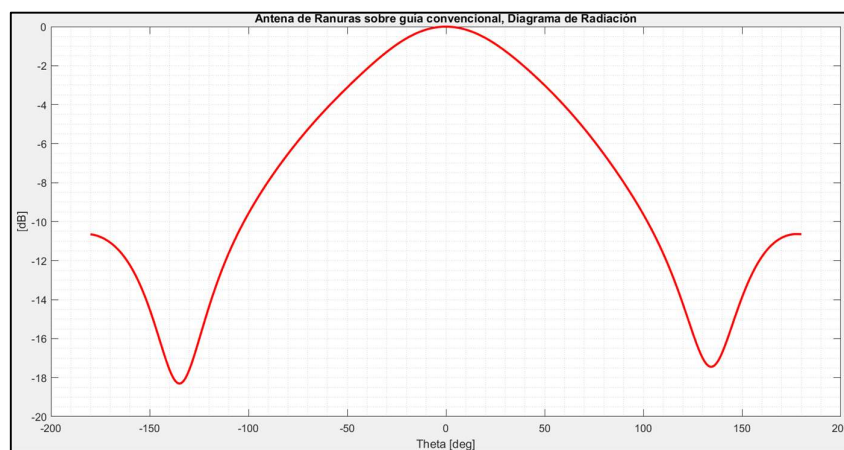


Figura 2.16. Diagrama de radiación normalizado en el plano YZ.

Para finalizar este análisis, en la Figura 2.16 se presenta el gráfico de la antena de ranuras en donde se aprecia la radiación por cada una de las ranuras implementadas, así como el campo eléctrico dentro de esta estructura.

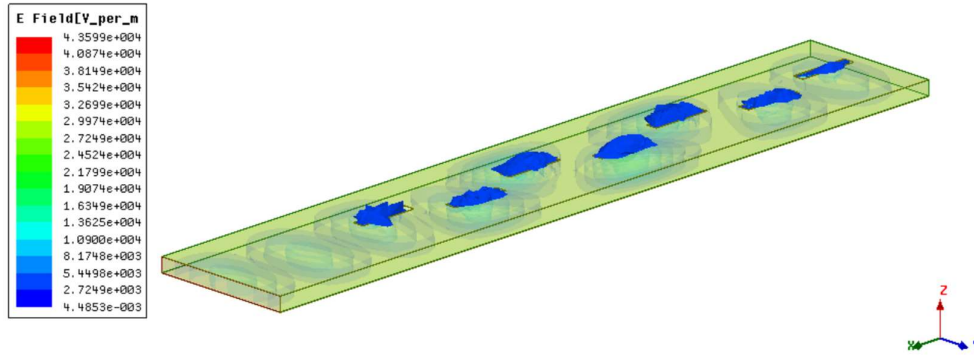


Figura 2.17. Campo eléctrico y radiación en la antena de ranuras.

2.5 Diseño de antena de ranuras en una guía de onda SIW

Al igual que en la sección anterior, el objetivo es implementar una antena de ranuras (de 7 elementos) pero sobre la guía SIW diseñada en el literal 2.3. De igual manera se parte del escalamiento de la guía que trabaja en el rango de frecuencias 6.8 GHz a 10 GHz. En la Figura 2.18 se aprecia la estructura de esta antena.

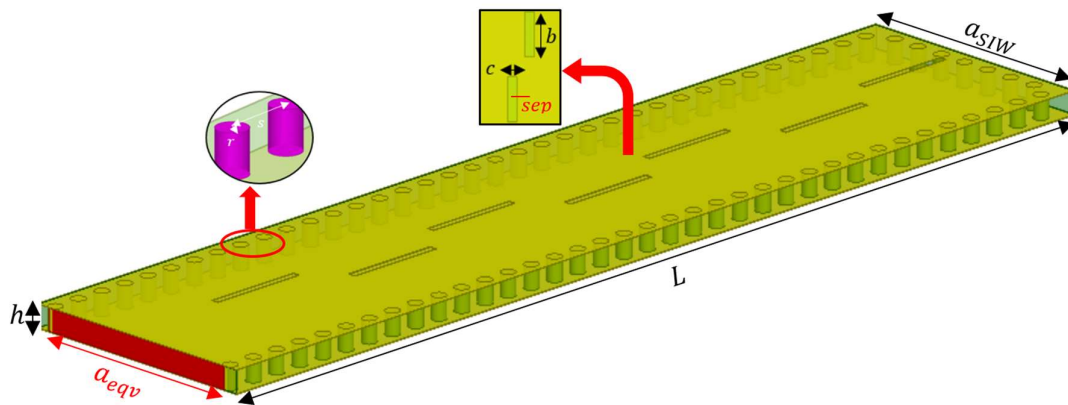


Figura 2.18. Antena de ranuras sobre guía de onda integrada en sustrato.

2.5.1. Dimensiones de la antena de ranuras sobre guía SIW

Una vez observados los resultados de la simulación de una antena de ranuras sobre una guía de onda convencional, se procede a implementar los parámetros de largo (b) y ancho (c) de ranuras sobre una guía de onda con tecnología SIW. A continuación, se repasan los cálculos que ya fueron realizados a lo largo de este capítulo, entre ellos se puede mencionar: *ancho de guía SIW* (a_{SIW}), *ancho equivalente* (a_{eqv}), *radio de los postes* (r) *separación entre las vías* (s).

- Amplitud de la guía SIW:

$$a_{eqv} = \frac{c}{2 * f_c * \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

$$a_{eqv} = \frac{3 * 10^8}{2 * 5.27 \text{ GHz} * \sqrt{3.55}}$$

$$\mathbf{a_{eqv} = 15.1 \text{ mm}}$$

- Longitud de onda en el dieléctrico:

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{10 \text{ GHz} * \sqrt{3.55}}$$

$$\mathbf{\lambda = 15.92 \text{ mm}}$$

- Longitud de onda guiada.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

$$\lambda_g = \frac{15.92 \text{ mm}}{\sqrt{1 - \left(\frac{5.27 \text{ GHz}}{10 \text{ GHz}}\right)^2}}$$

$$\mathbf{\lambda_g = 18.74 \text{ mm}}$$

- Radio de los postes de las vías (r) y separación entre centros (s):

$$2r < \frac{18.74 \text{ mm}}{10}$$

$$\mathbf{r < 0.937 \text{ mm}}$$

...

$$s \leq 4 * 0.937 \text{ mm}$$

$$\mathbf{s \leq 3.748 \text{ mm}}$$

- Ancho de la guía equivalente:

$$a_{SIW} = a_{eqv} + 2r + \frac{(2r)^2}{0.95s}$$

$$a_{SIW} = 15.1 \text{ mm} + 2(0.5 \text{ mm}) + \frac{(2 * 0.5 \text{ mm})^2}{0.95 * 2.5 \text{ mm}}$$

$$\mathbf{a_{SIW} = 16.52 \text{ mm}}$$

- Longitud de las ranuras:

$$b = \frac{\lambda_g}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}$$

$$b = \frac{18.74 \text{ mm}}{\sqrt{2(3.55 + 1)}}$$

$$\mathbf{b = 6.212 \text{ mm}}$$

- Ancho de las ranuras:

$$c \leq \frac{b}{2}$$

$$c \leq \frac{6.21}{10}$$

$$\mathbf{c \leq 0.621 \text{ mm}}$$

2.5.2. Simulación de la antena de ranuras sobre guía SIW

En la Tabla 2.4 se detallan los parámetros tomados en cuenta para la simulación de la antena de ranuras sobre guía de onda integrada en sustrato; se debe recalcar que, estos valores teóricos se toman en cuenta como datos iniciales, que posteriormente serán modificados para obtener los mejores resultados. Dichos resultados optimizados se pueden observar en el capítulo 3 de este trabajo.

Tabla 2.4. Parámetros utilizados para la antena de ranuras sobre guía SIW.

Variable	Valor
Frecuencia de trabajo (f)	10 GHz
Acho total de la guía SIW (a_{SIW})	16.52 mm
Ancho equivalente de la guía SIW (a_{eqv})	15.1 mm
Radio de los postes (r)	0.5 mm
Separación entre las vías (s)	2 mm
Ancho de la ranura (c)	0.61 mm
Longitud de la ranura (b)	6.1 mm
Separación entre ranuras y el centro horizontal de la guía (sep)	1 mm
Longitud de onda guiada (λ_g)	18.74 mm

El parámetro S_{11} obtenido para la simulación de la antena de ranuras implementada sobre guía SIW se indica en la Figura 2.19, mientras que la Figura 2.20 y 2.21 se muestra la gráfica del diagrama de radiación en el plano XZ y YZ respectivamente, la cual es alrededor

de 10 dB. Se debe recalcar que estos resultados se consiguen en base a los valores iniciales, mediante una optimización posterior se logrará su mejora.

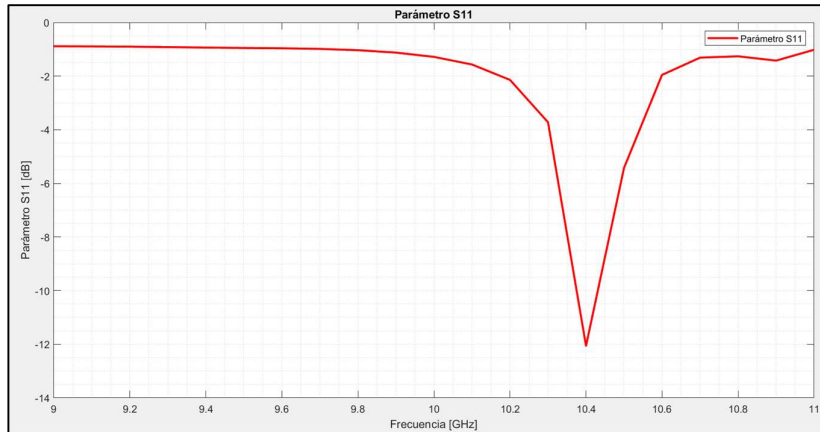


Figura 2.19. Parámetro S_{11} con los valores iniciales.

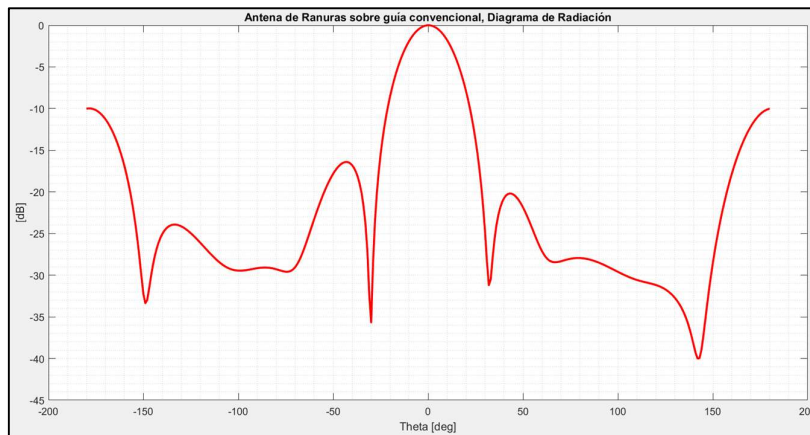


Figura 2.20. Diagrama de radiación normalizado, antena de ranuras sobre guía SIW, plano XZ.

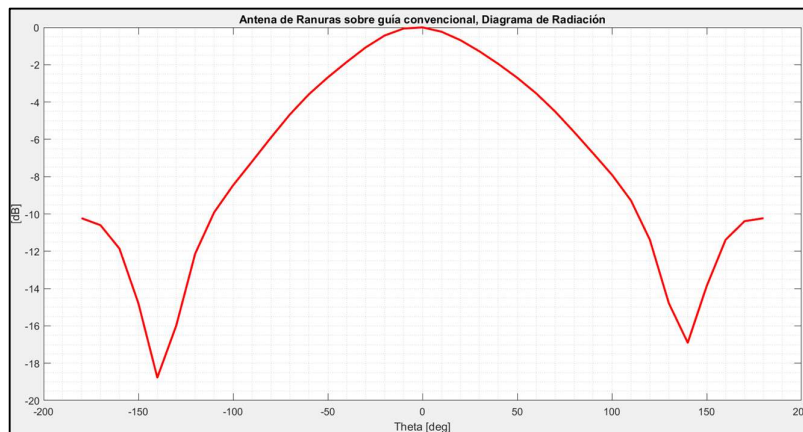


Figura 2.21. Diagrama de radiación normalizado, antena de ranuras sobre guía SIW, plano YZ.

Como parte final de esta sección, en la Figura 2.22 se presenta el campo eléctrico en la antena de ranuras. Se aprecia como este se encuentra confinado dentro de la agrupación de postes que simulan ser las paredes laterales de la guía de onda.

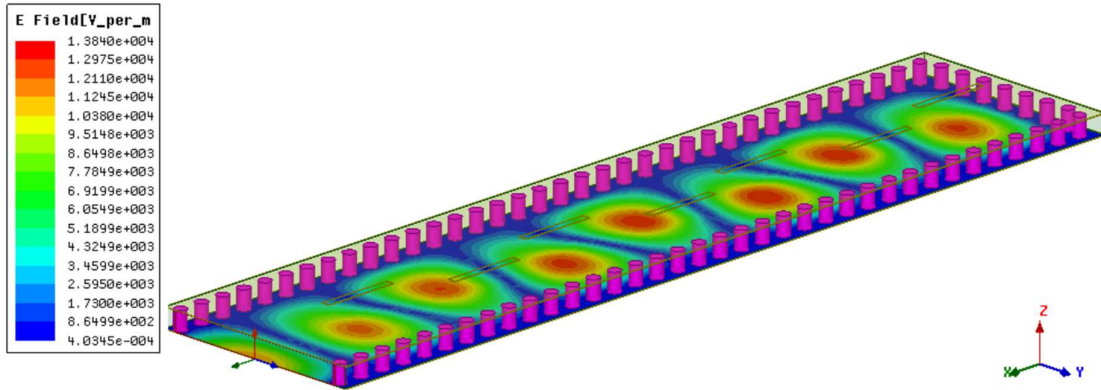


Figura 2.22. Campo eléctrico dentro de la antena de ranuras sobre guía SIW.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En esta sección del trabajo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para la antena de ranuras implementada sobre una guía de onda integrada en sustrato (SIW), se recalca que se ha utilizado el sustrato Rogers 4003-C con un grosor de 1.524 mm. Para este fin, se presentarán las gráficas del parámetro S_{11} , el diagrama de radiación y, para los valores finales, la gráfica de la eficiencia de la antena implementada.

3.1.1. Antena simulada con valores iniciales

A partir de los valores obtenidos para los cálculos realizados en el capítulo anterior y detallados en la Tabla 2.4 se procede a realizar la simulación de la antena de ranuras sobre guía de onda SIW, estos valores se consideran como iniciales ya que no se ha realizado una optimización en ninguno de los parámetros mencionados.

A continuación, en la Figura 3.1. se presenta la gráfica del parámetro S_{11} en donde se aprecia que, utilizando estos valores, existe un ligero desplazamiento de frecuencia, por lo que no se logra una correcta adaptación

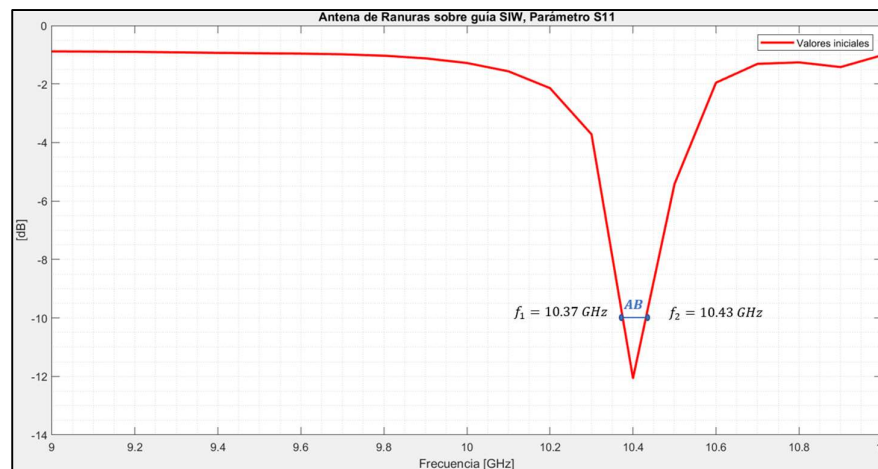


Figura 3.1. Parámetro S_{11} con valores iniciales de la antena de ranuras.

Mediante la Ecuación 3.1 se verifica el ancho de banda para la antena implementada, Se debe recalcar que este tipo de estructuras poseen un ancho de banda sumamente estrecho y es medido para aquellas frecuencias por debajo de los -10 dB. En esta simulación inicial se tiene un valor de 60 MHz, mismo que al ocupar la Ecuación 3.2 se establece que es alrededor del 0.6%.

$$AB = f_2 - f_1$$

Ecuación 3.1. Ancho de banda.

$$\%AB = \frac{f_2 - f_1}{f_{trabajo}} * 100$$

Ecuación 3.2. Ancho de banda porcentual.

3.1.2. Antena simulada con valores optimizados (finales)

Después de un arduo análisis de los diferentes parámetros que forman parte del diseño de la antena de ranuras sobre una guía de onda SIW, se ha llegado al mejor resultado, los valores tomados en cuenta para este fin se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores finales para la antena de ranuras.

Variable	Valor
Frecuencia de trabajo (f)	10 GHz
Acho total de la guía SIW (a_{SIW})	16.52 mm
Ancho equivalente de la guía SIW (a_{eqv})	15.1 mm
Radio de los postes (r)	0.5 mm
Separación entre las vías (s)	2 mm
Ancho de la ranura (c)	0.7 mm
Longitud de la ranura (b)	0.51 mm
Separación entre ranuras y el centro horizontal de la guía (sep)	1 mm
Longitud de onda guiada (λ_g)	18.74 mm

En comparación con la Tabla 2.4 donde se presentaron los valores iniciales, se aprecia que los parámetros más influyentes en esta estructura corresponden tanto al ancho como al largo de las ranuras (b y c respectivamente). A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación con las variables actualizadas.

En la Figura 3.1 se presenta el reporte del parámetro S_{11} donde se aprecia un resultado sumamente satisfactorio, esto en base a que la frecuencia de trabajo se encuentra totalmente acoplada a 10 GHz y su nivel de adaptación llega a un mínimo cercano a los -40 dB. Con este resultado se puede garantizar un desempeño óptimo de la antena de ranuras para aplicaciones en la banda X.

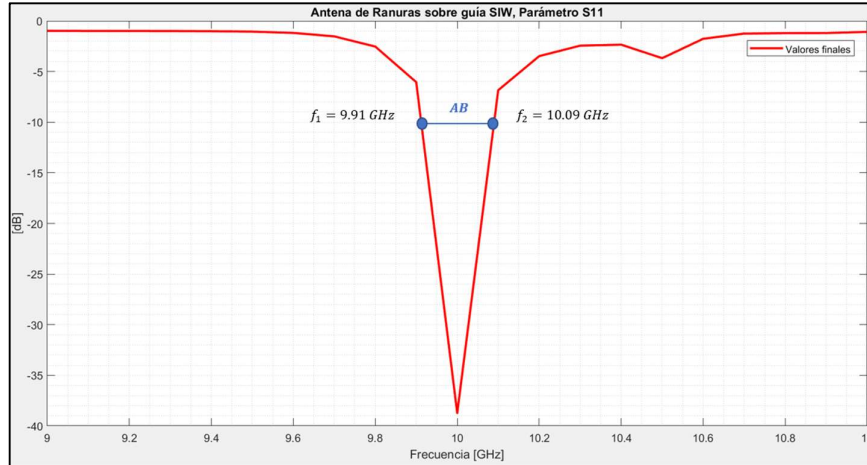


Figura 3.2. Reporte del parámetro S_{11} de la antena de ranuras con valores optimizados.

Para el ancho de banda se consideran los valores de frecuencia a partir de -10 dB, ya que la antena de ranuras trabajará de manera óptima en este rango, para este caso se tiene $f_1 = 9.91 \text{ GHz}$ y $f_2 = 10.09 \text{ GHz}$ obteniendo un ancho de banda igual a 180 MHz y porcentualmente del 1.8%.

Al tener la estructura con estos resultados satisfactorios, se procede también a analizar la eficiencia de radiación, este parámetro corresponde a la relación entre la ganancia y la directividad de la antena de ranuras; también puede ser definido como una relación de la potencia que radia la antena y la potencia entregada por la misma. Para antenas que trabajan a altas frecuencias, como es el caso, la eficiencia de radiación debe ser cercana o igual a 1. En este caso, se obtuvo una directividad de 10.87 dB y una ganancia igual a 9.73 dB.

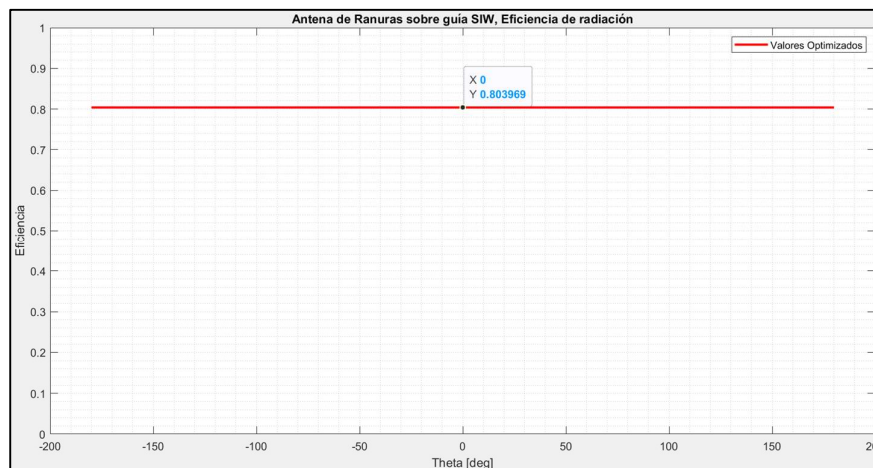


Figura 3.3. Eficiencia de radiación para la antena de ranuras con valores optimizados.

En la Figura 3.3 se aprecia un valor para la eficiencia de radiación cercano a 0.81, lo cual indica una correcta relación entre la ganancia y la directividad, este valor se debe a que se poseen pérdidas en el sustrato, esta es una de las desventajas de la tecnología SIW al trabajar a altas frecuencias. De todas maneras, se obtiene un resultado más que aceptable.

El diagrama de radiación en el plano XZ para la antena con los valores finales se presenta en la Figura 3.4, en él se aprecia un lóbulo mayor angosto ya que representa a las 7 ranuras en conjunto, mientras que la Figura 3.5 se presenta el diagrama en el plano YZ, aquí el lóbulo es mucho más ancho ya que refleja la directividad de uno solo de los slots.

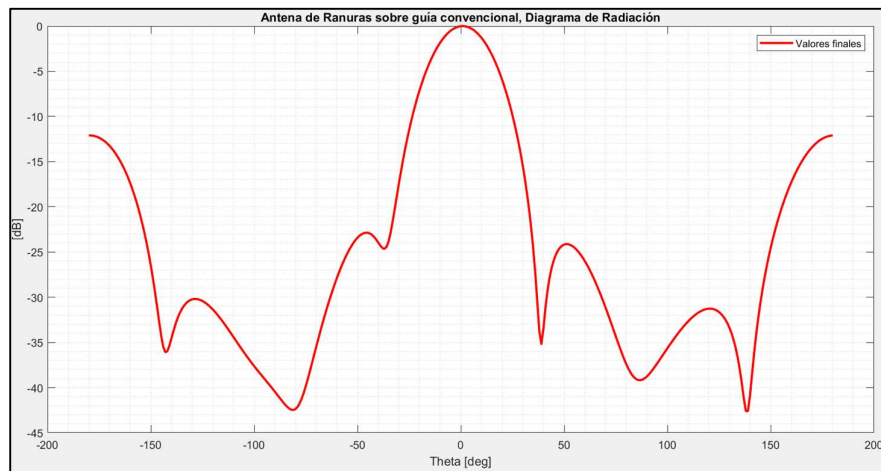


Figura 3.4. Diagrama de radiación en el plano XZ para la antena de ranuras con los valores finales.

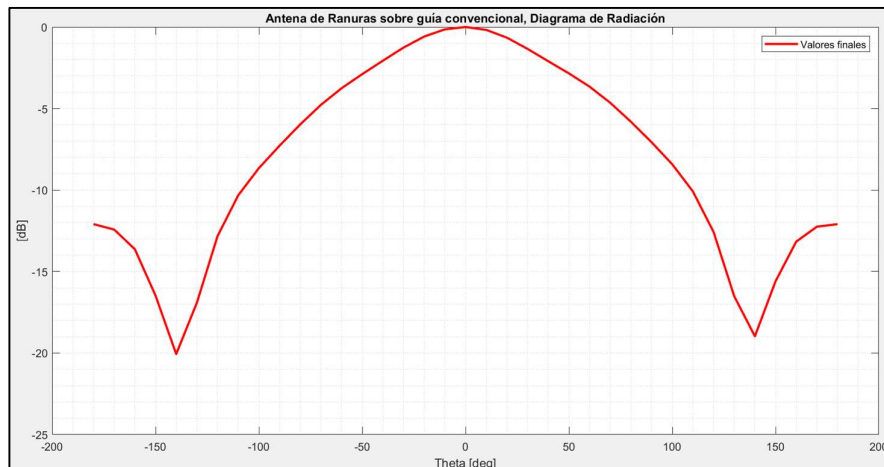


Figura 3.5. Diagrama de radiación en el plano YZ para la antena de ranuras con los valores finales.

Adicionalmente, en la Figura 3.6 se representa el diagrama de radiación 3D, se recalca que este tipo de antenas son sumamente directivas, observando el gráfico se comprueba esta característica ya que el lóbulo mayor ocupa prácticamente todo el diagrama, mientras la presencia de lóbulos secundarios es mucho menor. En la Figura 3.7 se detalla el diagrama de radiación en 2 dimensiones.

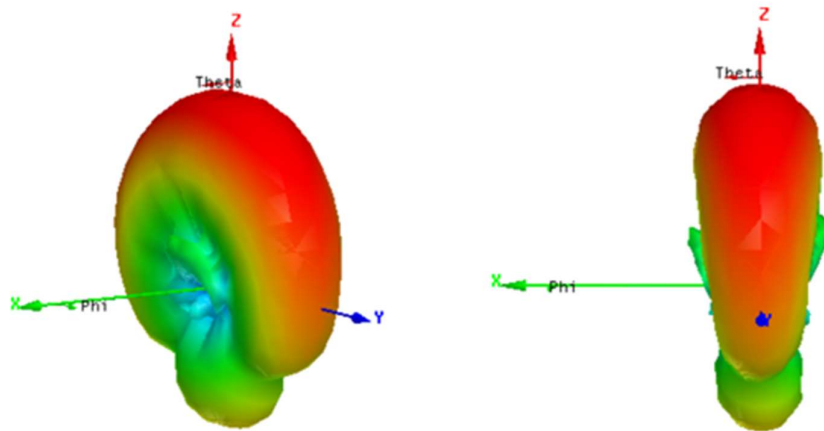


Figura 3.6. Patrón de radiación 3D para la antena de ranuras con valores optimizados en el plano YZ (izquierda) y el plano XZ (derecha).

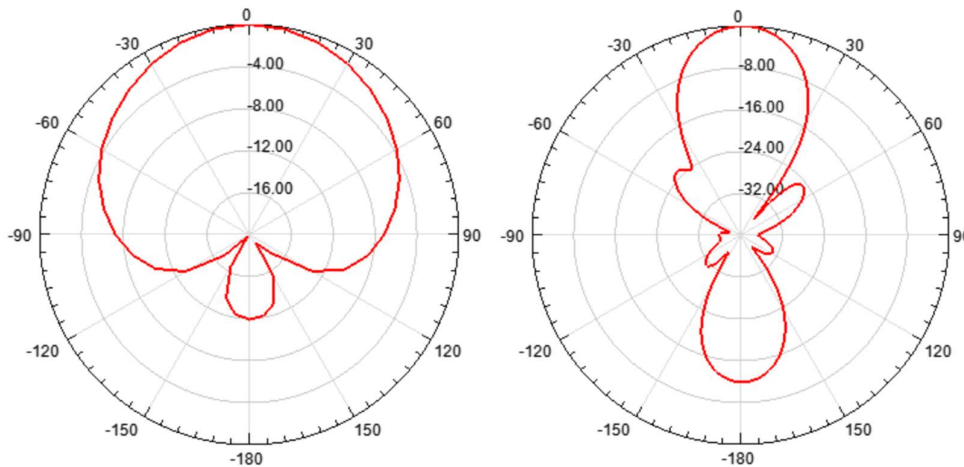


Figura 3.7. Diagrama de radiación 2D normalizado para la antena de ranuras con valores optimizados en plano YZ (izquierda) y plano XZ (derecha).

Una vez establecidos los parámetros finales para el mejor desempeño de la estructura implementada, se procede a analizar como la variación del ancho y el largo de las ranuras influye en el desempeño de la antena de ranuras, así como también la distancia de separación entre las ranuras y el centro de la guía. De igual manera, se analizará el criterio

de diseño de separación de $\frac{\lambda_g}{4}$ entre el borde final de la guía con el centro de la última ranura y cómo afecta los resultados obtenidos.

3.1.3. Análisis de tolerancia

3.1.3.1. Variación de la longitud de las ranuras (b)

Como se mencionó en párrafos anteriores, tanto el largo como el ancho de las ranuras influyen de manera directa en la adaptación de la antena a la frecuencia de trabajo deseada. A fin de estudiar este comportamiento, se procede a realizar tres variaciones para cada parámetro de manera separada, empezando por la longitud de las ranuras (b).

A fin de agilizar el análisis de la influencia de este parámetro, en la Tabla 3.2 se presenta el resumen de los valores tomados en cuenta y los resultados obtenidos.

Tabla 3.2. Resumen de resultados con la variación del parámetro (b).

No de simulación	1	2	3
Largo de la ranura (b)	7 mm	6.5 mm	7.5 mm
Frecuencia	10 GHz	10.3 GHz	9.8 GHz
Nivel de adaptación	-40 dB	-12 dB	-10 dB

Se aprecia que una variación de 0.5 mm en la longitud de las ranuras afecta significativamente el desempeño de la antena, provocando un desplazamiento de frecuencia y un bajo nivel de adaptación. En la Figura 3.8 se presenta la gráfica que compara el parámetro S_{11} obtenidos con los valores de la Tabla 3.2.

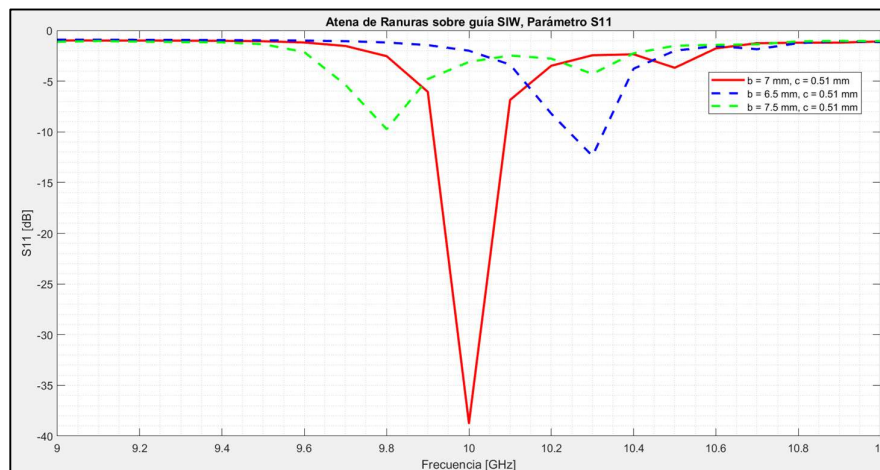


Figura 3.8. Comparación de resultados obtenidos para el parámetro S11.

Con los resultados observados no se tiene un buen nivel de adaptación para poder llegar a un estimado de tolerancia, es por esto por lo que se procede a realizar una nueva simulación, pero, esta vez considerando una variación de 0.02 mm. En la Tabla 3.3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 3.3. Resumen de resultados con la nueva variación del parámetro (*b*).

No de simulación	1	2	3
Largo de la ranura (<i>b</i>)	7 mm	6.98 mm	7.02 mm
Frecuencia	10 GHz	10 GHz	10 GHz
Nivel de adaptación	-40 dB	-27 dB	-23 dB

En la Figura 3.9 se aprecia que al variar en valor de 2 micras la longitud de las ranuras de la antena se obtienen resultados también aceptables, considerando que ambas modificaciones adaptan la frecuencia de trabajo a 10 GHz y a un nivel por debajo de -20 dB. Por ende, se puede mencionar que la longitud de las ranuras puede tener un error de ± 0.02 mm (± 2 μ m).

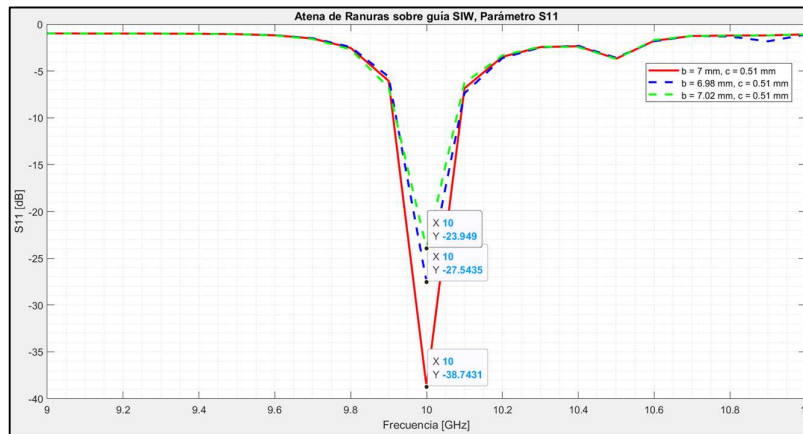


Figura 3.9. Comparación de resultados del parámetro S_{11} con la variación realizada en la longitud de las ranuras.

3.1.3.2. Variación del ancho de las ranuras (*c*)

Con el análisis y los resultados observados en la variación de la longitud de las ranuras (*b*), se procede a hacer lo correspondiente con el ancho de estos elementos (*c*). Para este fin, se ha considerado también una variación de 0.02 mm para el mejor valor obtenido de 0,51 mm. En la Tabla 3.4 se presenta el resumen de los resultados obtenidos con dichas modificaciones.

Tabla 3.4. Resumen de resultados con la variación del parámetro (c).

No de simulación	1	2	3
Ancho de ranuras (c)	0.51 mm	0.49 mm	0.53 mm
Frecuencia	10 GHz	10 GHz	10 GHz
Nivel de adaptación	-40 dB	-26.8 dB	-24.6 dB

Los resultados gráficos se presentan en la Figura 3.10 en donde, al igual que en la sección anterior, se presentan resultados más que aceptables con las modificaciones realizadas ya que la frecuencia se encuentra acoplada a 10 GHz y el nivel de adaptación permanece por debajo de los -20 dB. Por ende, se obtiene un nivel de error aceptable en el ancho de las ranuras de ± 0.02 mm (± 2 μ m).

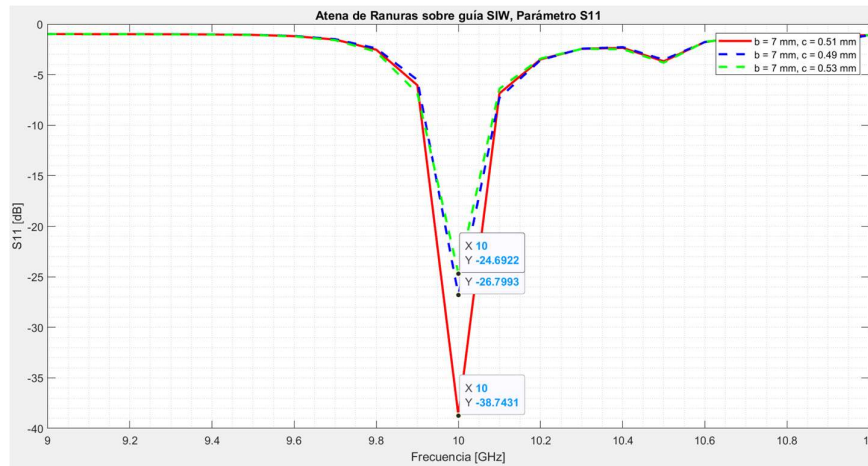


Figura 3.10. Comparación de resultados del parámetro S_{11} con la variación realizada en el ancho de las ranuras.

3.1.3.3. Variación de la separación entre ranuras y centro de la guía

Otro parámetro importante para analizar es la separación entre el centro de la cara ancha de la guía y el borde de las ranuras, en la Tabla 3.1 este parámetro se especifica como (sep) y el valor óptimo obtenido es de 2 mm. Se realizarán variaciones de 0.05 mm para observar la influencia de este parámetro en el desempeño de la antena de ranuras.

En la Tabla 3.5 se detalla el resumen de los resultados obtenidos para una variación superior e inferior de 0.05 mm.

Tabla 3.5. Resumen de resultados con la variación del parámetro (*sep*).

No de simulación	1	2	3
Ancho de ranuras (<i>c</i>)	1 mm	0.95 mm	1.05 mm
Frecuencia	10 GHz	10 GHz	10 GHz
Nivel de adaptación	-40 dB	-17.6 dB	-20.9 dB

El gráfico del parámetro S_{11} con las variaciones realizadas se presenta en la Figura 3.11, se observa que este parámetro influye, al igual que los otros que han sido analizados, en el nivel de adaptación de la antena. En este caso, se tiene un mayor nivel de afectación en la adaptación ya que el parámetro S_{11} no llega a un valor considerablemente menor a -20 dB.

Con este resultado se considera que la antena no tendrá un buen nivel de adaptación si este parámetro se modifica, algo que debe ser tomado en cuenta en el proceso de fabricación.

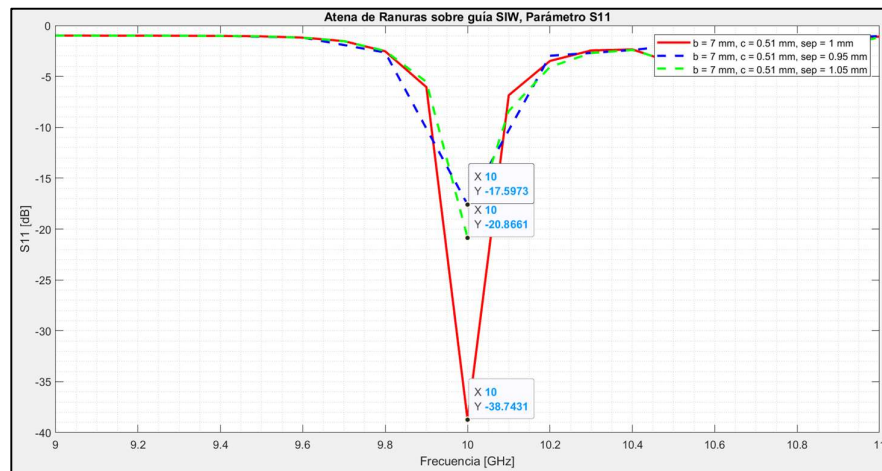


Figura 3.11. Parámetro S_{11} con las variaciones en el parámetro (*sep*).

3.1.3.4. Variación de la distancia entre el borde final de la guía y el centro del último elemento

Como se especificó en la teoría, uno de los criterios para el diseño de la antena de ranuras es la distancia de $\frac{\lambda_g}{4}$ entre el final de la guía de onda y el centro del último elemento. Después de la optimización realizada para los valores finales, se tiene un valor de 4 mm para este parámetro. Para su modificación se consideró una variación tanto superior como inferior de 0.2 mm, en la Tabla 3.6 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 3.6. Resumen de resultados con la variación considerada.

No de simulación	1	2	3
Ancho de ranuras (c)	4 mm	3.8 mm	4.2 mm
Frecuencia	10 GHz	10 GHz	10 GHz
Nivel de adaptación	-40 dB	-24.1 dB	-30.1 dB

Nuevamente, se observa que las variaciones realizadas no afectan la frecuencia a la que se adapta la antena ranurada sino más bien su nivel de adaptación. En este caso, se tiene que con las modificaciones también se tendría un desempeño óptimo de la antena.

En la Figura 3.12 se presenta el detalle del parámetro S_{11} con las variaciones contempladas.

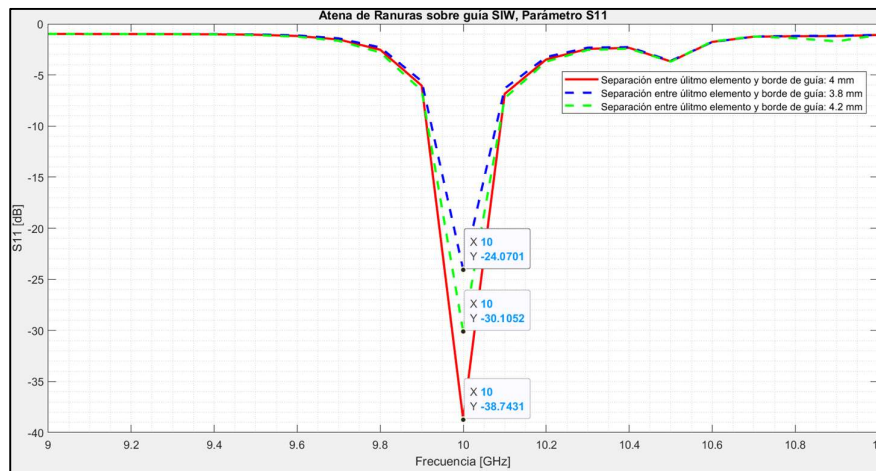


Figura 3.12. Parámetro S_{11} con las variaciones consideradas.

En general, con los parámetros considerados y analizados después de ser modificados, se aprecia que la antena es sumamente sensible, especialmente en el nivel de acoplamiento, por lo que se podría decir que su tolerancia no es muy alta, las variaciones recomendadas para esta estructura no deberían ser mayores a ± 0.05 mm.

3.2 Conclusiones

Gracias a la teoría presentada y analizada en este trabajo de integración curricular, después de un proceso de implementación y análisis de las tecnologías de guía de onda (convencional y SIW), se consiguió una antena de ranuras compuesta por 7 elementos sobre una guía de onda integrada en sustrato (SIW).

El análisis de la tecnología SIW permite comprender su funcionamiento a altas frecuencias, en donde se pueden implementar soluciones con diseños de dimensiones significativamente menores a las convencionales.

La selección adecuada del radio de los cilindros metálicos que componen las vías de la guía SIW, así como la distancia de separación entre el centro de las vías, permite que el campo eléctrico permanezca confinado entre los postes simulando las paredes de una guía de onda convencional; tomando esta consideración se optó por una medida de radio de los postes igual a 0.5 mm y una separación entre los centros de las vías de 2 mm, como los resultados lo demuestran, el campo eléctrico se mantiene confinado y la antena final presentan un diagrama de radiación satisfactorio.

La antena de ranuras posee dos criterios elementales para el posicionamiento de las ranuras, estos son: 1) una separación de $\frac{\lambda_g}{4}$ desde el final de la guía de onda hasta el centro del último elemento y 2) una separación de $\frac{\lambda_g}{2}$ entre centros de ranuras. Se debe implementar y comprobar que estas distancias sean respetadas, especialmente la primera condición ya que la variación de ella afectará de manera significativa el desempeño de la antena.

El sustrato que se elija para la realización de la antena de ranuras sobre guía de onda SIW es importante, un sustrato con permitividad alta requerirá dimensiones mucho menores en la estructura, mientras que un sustrato con permitividad relativamente baja incrementará las medidas.

Como menciona la teoría, para este tipo de estructuras (antenas de ranuras) tanto en guía de onda convencional como también en guía SIW, se tiene un ancho de banda sumamente estrecho, esto se aprecia en los resultados finales ya que se tiene un ancho de banda de únicamente 180 MHz.

En base al análisis realizado para las diferentes modificaciones presentadas, se concluye que el valor del largo de las ranuras influye directamente con la frecuencia a la que se

adaptará la antena, determinando que a un mayor valor de este parámetro se tendrá una menor frecuencia.

Por otro lado, el ancho de las ranuras afecta principalmente el nivel de adaptación de la estructura a la frecuencia de operación, para este parámetro se tiene una relación inversamente proporcional, ya que a menor ancho se tiene un mayor nivel de adaptación.

Se analizaron los resultados comparativamente, incluyendo un resumen de cada uno de los parámetros más importantes obtenidos, en donde se comprobó como las modificaciones afectan el desempeño de la antena y en base a ello tener un punto de partida para un mejor criterio de qué aspectos modificar y en qué medida, obteniendo como resultado una antena de ranuras sumamente directiva con un diagrama de radiación acorde a lo esperado.

3.3 Recomendaciones

El diseño, simulación y la optimización de este tipo de estructuras demandan una alta carga computacional, se recomienda utilizar un equipo que pueda sobrellevar estas exigencias para trabajar de manera más eficiente.

Se recomienda no considerar un valor exagerado de ranuras (elementos) para el diseño de este tipo de antenas, ya que, con cada elemento que se incrementa también es muy probable que el ancho de banda se estreche aún más.

Para futuros trabajos sería recomendable ocupar otro tipo de sustrato, de preferencia más grueso, para conseguir un mejor guiado de las ondas.

Como se presentó en este escrito, para implementar de manera correcta la antena de ranuras sobre guía SIW se recomienda partir de los conceptos básicos de guías de onda, tanto convencional como SIW, para su implementación y posterior diseño de la antena de ranuras sobre estructuras ya optimizadas.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] K. Wu, D. Deslandes y Y. Cassivi, «The Substrate Integrated Circuits - A New Concept for High-Frequency Electronics and Optoelectronics,» Noviembre 2003. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/4044116_The_Substrate_Integrated_Circuits_-_A_New_Concept_for_High-Frequency_Electronics_and_Optoelectronics. [Último acceso: Febrero 2023].
- [3] C. M. Gutierrez, «Diseño de filtros paso-bajo en tecnología de guía de onda integrada en sustrato (SIW), para aplicaciones espaciales,» Cartagena, 2015.
- [4] D. V. Navarro Méndez, Nuevos sistemas radiantes realizados con tecnologías impresas, Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2015.
- [5] J. L. Moreno Ayala, «Diseño y construcción de un lente de rotman en banda KU utilizando tecnología de guía de onda integrada en sustrato,» Sangolquí, 2017.
- [6] L. I. Rubio Mejía, Diseño de antenas de bocina sobre SIW, Madrid, 2014.
- [7] E. R. Llugsa Toapanta, Diseño y construcción de redes de distribución de potencia para la banda KU en tecnología de guía de onda integrada en sustrato (SIW), Sangolquí, 2018.
- [8] J. Roselló Fabregat, Array antena SIW 24 GHz para radar de automóviles, Catalunya, 2015.
- [9] «Capítulo 2: Guías de onda y líneas de transmisión,» [En línea]. Available: https://www.tsc.uc3m.es/~luise/MO-CAF/guias-lineas_05-06.pdf. [Último acceso: Febrero 2023].
- [10] «Guía de onda rectangular,» 6 Diciembre 2012. [En línea]. Available: <http://guiasdeonda-sanchez.blogspot.com/2012/12/guia-de-onda-rectangular.html>. [Último acceso: Febrero 2023].
- [11] N. Sánchez Rodríguez, Análisis y diseño de filtros de cavidades directamente acopladas en tecnología SIW, Leganés, 2016.
- [12] J. L. Mas Campos, Diseño de un array bidimensional de parches sobre SIW en banda KU con optimización de acoplos mutuos, Madrid, 2015.
- [13] D. V. Navarro Méndez, F. Carrera y M. Baquero, Guías de onda Integradas en Sustrato para Aplicaciones en las Bandas de Microondas y Ondas Milimétricas.
- [14] «Capítulo 4: Substrate Integrated Waveguide (SIW),» [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo4.pdf. [Último acceso: 2023 Febrero].

- [15] D. V. Navarro Méndez, Diseño, simulación y construcción de antenas de ranura en banda Ku con Tecnología SIW, 2010.
- [16] J. Chocarro Álvarez y I. Eterra Urzainqui, Diseño de una "substrate integrated waveguide" antena usando metasuperficies, Pamplona, 2020.
- [17] «Flann Microwave,» [En línea]. Available: <https://flann.com/wp-content/uploads/2015/09/Flann-Final-2015-for-Website-Use-06082015.pdf>. [Último acceso: Febrero 2023].
- [18] N. S. Ramírez Guanotasig, «Excitación de una guía SIW utilizando línea coaxial en banda X,» Quito, 2022.
- [19] M. E. Malliquinga Guerrero, «Excitación de una guía SIW utilizando línea microstrip y la SIW,» Quito, 2022.

5 ANEXOS

ANEXO I. DATASHEET DEL SUSTRATO ROGERS 4003-C

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, ϵ_r Process	3.38 ± 0.05	⁽¹⁾ 3.48 ± 0.05	Z	-	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
⁽²⁾ Dielectric Constant, ϵ_r Design	3.55	3.66	Z	-	8 to 40 GHz	Differential Phase Length Method
Dissipation Factor tan, d	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031	Z	-	10 GHz/23°C 2.5 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Thermal Coefficient of ϵ_r	+40	+50	Z	ppm/°C	-50°C to 150°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	1.7 X 10 ¹⁰	1.2 X 10 ¹⁰	-	MΩ·cm	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Surface Resistivity	4.2 X 10 ⁹	5.7 X 10 ⁹	-	MΩ	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Electrical Strength	31.2 (780)	31.2 (780)	Z	KV/mm (V/mil)	0.51mm (0.020")	IPC-TM-650 2.5.6.2
Tensile Modulus	19,650 (2,850) 19,450 (2,821)	16,767 (2,432) 14,153, (2,053)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Tensile Strength	139 (20.2) 100 (14.5)	203 (29.5) 130 (18.9)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Flexural Strength	276 (40)	255 (37)	-	MPa (kpsi)	-	IPC-TM-650 2.4.4
Dimensional Stability	<0.3	<0.5	X,Y	mm/m (mils/inch)	after etch +E2/150°C	IPC-TM-650 2.4.39A
Coefficient of Thermal Expansion	11 14 46	10 12 32	X Y Z	ppm/°C	-55 to 288°C	IPC-TM-650 2.4.41
Tg	>280	>280	-	°C TMA	A	IPC-TM-650 2.4.24.3
Td	425	390	-	°C TGA		ASTM D3850
Thermal Conductivity	0.71	0.69	-	W/m ² /K	80°C	ASTM C518
Moisture Absorption	0.06	0.06	-	%	48 hrs immersion 0.060" sample Temperature 50°C	ASTM D570
Density	1.79	1.86	-	g/cm ³	23°C	ASTM D792
Copper Peel Strength	1.05 (6.0)	0.88 (5.0)	-	N/mm (pli)	after solder float 1 oz. EDC Foil	IPC-TM-650 2.4.8
Flammability	N/A	⁽³⁾ V-0	-	-	-	UL 94
Lead-Free Process Compatible	Yes	Yes	-	-	-	-

NOTES:

- (1) RO4350B 4 mil laminates have a process Dk of 3.33 ± 0.05 and are in conformance with IPC-4103A/240. All other RO4350B laminate thicknesses are /11 and /240 compliant.
- (2) The design Dk is an average number from several different tested lots of material and on the most common thickness/s. If more detailed information is required, please contact Rogers Corporation or refer to Rogers' technical papers in the Rogers Technology Support Hub available at <http://www.rogerscorp.com>.
- (3) RO4350B LoPro[®] laminates do not share the same UL designation as standard RO4350B laminates. A separate UL qualification may be necessary.

Typical values are a representation of an average value for the population of the property. For specification values contact Rogers Corporation.

RO4000 LoPro laminate uses a modified version of the RO4000 resin system to bond reverse treated foil. Values shown above are RO4000 laminates without the addition of the LoPro resin. LoPro foil results in an overall thickness increase of approximately 0.0007" (18µm) per core.

The LoPro Resin Dk is approximately 2.4. **However, when used in combination with the base laminate system, the average design Dk noted in the data sheet table should be used.** (The design Dk value decreases by about 0.1 as the core thickness decreases from 0.020" to 0.004".)

Prolonged exposure in an oxidative environment may cause changes to the dielectric properties of hydrocarbon based materials. The rate of change increases at higher temperatures and is highly dependent on the circuit design. Although Rogers' high frequency materials have been used successfully in innumerable applications and reports of oxidation resulting in performance problems are extremely rare, Rogers recommends that the customer evaluate each material and design combination to determine fitness for use over the entire life of the end product.

100 S. Roosevelt Avenue, Chandler, AZ 85226
Tel: 480-961-1382 Fax: 480-961-4533 www.rogerscorp.com

Standard Thicknesses	Standard Panel Sizes	Standard Claddings
RO4003C: 0.008" (0.203mm) +/- 0.0010" 0.012" (0.305mm) +/- 0.0010" 0.016" (0.406mm) +/- 0.0015" 0.020" (0.508mm) +/- 0.0015" 0.032" (0.813mm) +/- 0.0020" 0.060" (1.524mm) +/- 0.0040" RO4350B: 0.004" (0.10mm) +/- 0.0007" 0.0066" (0.17mm) +/- 0.0007" 0.010" (0.25mm) +/- 0.0010" 0.020" (0.51 mm) +/- 0.0015" 0.030" (0.76mm) +/- 0.0020" 0.060" (1.52mm) +/- 0.0040" *Additional non-standard thicknesses available from 0.0066" - 0.060" in varying increments	24" X 18" (610 X 457 mm) 24" X 21" (610 X 533 mm) 24" X 36" (610 X 915 mm) 48" X 36" (1219 X 915 mm) *Additional panel sizes available	<u>Electrodeposited Copper Foil</u> ½ oz. (18µm) HH/HH 1 oz. (35µm) H1/H1 *Additional cladding weights are available

*Contact Customer Service or Sales Engineering to inquire about additional available product configurations

The information in this data sheet is intended to assist you in designing with Rogers' circuit materials. It is not intended to and does not create any warranties express or implied, including any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose or that the results shown on this data sheet will be achieved by a user for a particular purpose. The user should determine the suitability of Rogers' circuit materials for each application.

The Rogers' logo, Helping power, protect, connect our world, LoPro, RO3003, RO4000, RO4350B, and RO4003C are trademarks of Rogers Corporation or one of its subsidiaries.

© 2022 Rogers Corporation, Printed in U.S.A.,
 All rights reserved. Revised 1592 080322 **PUB# 92-004**

100 S. Roosevelt Avenue, Chandler, AZ 85226
 Tel: 480-961-1382 Fax: 480-961-4533 www.rogerscorp.com

Page 4 of 4

Helping power, protect, connect our world®