

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE GUÍAS DE ONDA PARA EL CALENTAMIENTO DE
MATERIALES CON MICROONDAS**

FABIÁN DAVID SOLANO TORRADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga, Abril de 2008

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE GUÍAS DE ONDA PARA EL CALENTAMIENTO DE
MATERIALES CON MICROONDAS**

FABIÁN DAVID SOLANO TORRADO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Electrónico**

Director: Ing. Carlos Rodrigo Correa Cely Ph.D.

Codirector: Ing. Rodolfo Villamizar Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga, Abril de 2008

Dedico este trabajo fruto de esfuerzo y dedicación a mi Dios todo poderoso, quien en su sabiduría y magnificencia me ha mostrado la luz del camino, dándome el conocimiento necesario para entender el porque de muchos sucesos en mi vida.

Especialmente a mis padres Libardo Alfonso y Fabiola que con su paciencia, amor, comprensión y tenacidad han hecho de mi una persona correcta, amable y de buenos sentimientos. Aunque no puedas estar presente se que me has, estas y estarás acompañando siempre. Gracias por todo, madre.

A mis hermanos que amo Johann Leonardo y Vanessa Torcoroma por su apoyo, por su ejemplo y por mantener esa idea hermosa de mantenernos por siempre como una familia.

A Leavith mi novia, mi negra querida por amarme y acompañarme en los momentos que más lo he necesitado.

A Wilson Alfredo y Jose Trinidad por que por ellos puedo decir que la mejor etapa de la vida es la Universitaria.

A la Tuna UIS por ser forjadora en gran parte de mi formación personal.

Fabián David Solano Torrado.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

EL profesor Carlos Rodrigo Correa Cely, por su apoyo y colaboración en la orientación de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad brindada.

A todos los docentes, que con sus enseñanzas y aportes hicieron posible este sueño.

Al convenio de la E3T con el grupo de investigación en Alemania y propietario de uno de los programas de mayor uso en el área de la simulación electromagnética por medio del cual se utilizó el programa CST Studio suite.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
METODOLOGÍA	16
1. CONOCIMIENTO PREVIO	18
1.1. SOPORTE CONCEPTUAL	22
1.1.1. <i>GENERACIÓN DE MICROONDAS</i>	22
1.1.2. <i>ASPECTOS GENERALES</i>	23
1.1.3. <i>INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON LOS MATERIALES</i>	25
1.1.4. <i>PROPAGACIÓN EN DIELECTRICOS</i>	27
1.1.5. <i>TEOREMA DE POYNTING</i>	32
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	35
2.1. GUÍAS DE ONDA	36
2.1.1. <i>Ventajas</i>	37
2.1.2. <i>Desventajas</i>	38
2.2. TIPOS DE GUÍAS DE ONDAS	39
2.3. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE UNA GUÍA DE ONDA	40
2.4. MODOS DE OPERACIÓN EN UNA GUÍA DE ONDA	41
2.5. GUÍAS DE ONDA RECTANGULAR	43
2.6. MODOS EN GUÍAS RECTANGULARES	46
2.6.1. <i>Modo TE_{mn}</i>	46
2.6.2. <i>Modo TM_{mn}</i>	50
2.7. PROPIEDADES DE UNA GUÍA DE ONDA RECTANGULAR CON UNA ONDA DOMINANTE	52
2.7.1. <i>Voltaje y corriente</i>	52
2.7.2. <i>Potencia</i>	53
2.7.3. <i>Impedancia característica</i>	53
2.7.4. <i>Atenuación</i>	54
2.8. GUÍAS DE ONDA CIRCULARES	56
2.8.1. <i>Modo TE</i>	58
2.8.2. <i>Potencia</i>	62
2.8.4. <i>Modo TM</i>	63
2.9. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS Y DEL FACTOR DE CALIDAD	64
2.9.1. <i>Pérdidas dieléctricas</i>	64

2.9.2.	<i>Pérdidas superficiales</i>	65
2.9.3.	<i>Pérdidas de potencia</i>	65
2.9.4.	<i>Factor Q</i>	65
2.10.	CARBURO DE SILICIO (SiC).....	66
3.	SIMULACIÓN DE GUÍAS DE ONDA	68
3.1.	DISEÑO DE GUÍAS RECTANGULARES.....	68
3.2.	BANDA DE OPERACIÓN DE UNA GUÍA DE ONDA RECTANGULAR	77
3.3.	CARACTERÍSTICAS DE UNA GUÍA DE ONDAS RECTANGULAR.....	79
3.4.	DISEÑO EN GUÍAS CIRCULARES	87
4.	MODELADO DEL CARBURO DE SILICIO DENTRO DE UNA GUÍA DE ONDA RECTANGULAR.....	95
4.1.	CONCLUSIONES.....	109
4.2.	RECOMENDACIONES	110
	BIBLIOGRAFÍA	111
	ANEXO A	115

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Tipos de guías de onda.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 2: Raíces de las funciones de Bessel para varios modos de operación TEnm en una guía de onda circular.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3: Raíces de las funciones de Bessel para varios modos de operación TMnm en una guía de onda circular.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4: Propiedades del carburo de silicio.</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5: Valores estándar en una guía de ondas rectangular.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 6: Resultados teóricos del ejemplo propuesto.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 7: Resumen de resultados de la simulación.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 8: Rangos de frecuencia y medidas estándar de una guía de ondas circular.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 9: Resultado general de la simulación para un total de 10 modos.....</i>	<i>94</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 0-1: Metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo.....</i>	<i>16</i>
<i>FIGURA 0-2: Distribución de la temperatura, debido a las pérdidas de electricidad en un circuito integrado.....</i>	<i>20</i>
<i>FIGURA 0-3: Simulación del campo electromagnético, (Far-field) de una antena en un helicóptero. Aplicación militar.....</i>	<i>21</i>
<i>FIGURA 0-4: Distribución del campo eléctrico en el sistema global para comunicaciones móviles (GMS) en la banda de frecuencias de 1,8GHz.....</i>	<i>21</i>
<i>FIGURA 2-1: Guías de onda elíptica, rectangular y cilíndrica.....</i>	<i>37</i>
<i>FIGURA 2-2: Dimensión interna de la guía de ondas rectangular.....</i>	<i>44</i>
<i>FIGURA 2-3: Representación de la velocidad de fase.....</i>	<i>45</i>
<i>FIGURA 2-4: Guía de onda circular.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 3-1: Modos electromagnéticos para dimensión de (a) <61.....</i>	<i>69</i>
<i>FIGURA 3-2: Modos electromagnéticos para dimensión de (a) >61.....</i>	<i>70</i>
<i>FIGURA 3-3: Transmisión del campo eléctrico del modo TE_{10}.....</i>	<i>70</i>
<i>FIGURA 3-4: Transmisión del campo eléctrico del modo TE_{01}.....</i>	<i>71</i>
<i>FIGURA 3-5: Campo eléctrico de los dos modos siguientes a TE_{10} y TE_{01}.....</i>	<i>71</i>
<i>FIGURA 3-6: Frecuencia de operación aumentada tres veces.....</i>	<i>72</i>
<i>FIGURA 3-7: Número de modos a 2,45 GHz para dimensiones de (a) menores de 61 mm.....</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 3-8: Guía con dimensión de (a) mayor de 61 mm.....</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 3-9: Modo de propagación principal TE_{10} cuando la relación de dimensiones es 3:1.....</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 3-10: Muestra de dos modos no propagados, cuando la relación de dimensiones es 3:1.....</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 3-11: Perdidas típicas en guías de onda rectangulares y cilíndricas [NER99].....</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 3-12: Guía de onda rectangular, a= 22,86 mm y b= 10,16 mm.....</i>	<i>79</i>
<i>FIGURA 3-13: Representación del primer modo.....</i>	<i>80</i>
<i>FIGURA 3-14: Representación del segundo modo.....</i>	<i>81</i>
<i>FIGURA 3-15: Representación del tercer modo.....</i>	<i>81</i>
<i>FIGURA 3-16: Representación del cuarto modo.....</i>	<i>82</i>
<i>FIGURA 3-17: Forma alternativa de representación del cuarto modo.....</i>	<i>82</i>
<i>FIGURA 3-18: Propagación a lo largo de la guía donde se puede mostrar conjuntamente el cambio de fase por el cambio de dirección de las flechas.....</i>	<i>84</i>
<i>FIGURA 3-19: Segunda forma de representación. Tipo de diagrama Carpet. Donde las depresiones y elevaciones muestran la forma en que la onda TE varía a medida que se desplaza a lo largo de la guía.....</i>	<i>85</i>
<i>FIGURA 3-20: Frecuencia de corte para el modo TE_{11} y TM_{01} en una guía circular.....</i>	<i>88</i>
<i>FIGURA 3-21: Guía de onda circular con material PEC y aire en su interior.....</i>	<i>91</i>
<i>FIGURA 3-22: Propagación del campo eléctrico del modo TE_{11} en la guía circular.....</i>	<i>91</i>
<i>FIGURA 3-23: Modo TE_{11}, arriba líneas de campo eléctrico, abajo líneas de campo magnético....</i>	<i>92</i>
<i>FIGURA 3-24: Modo TE_{01}, arriba líneas de campo eléctrico, abajo líneas de campo magnético....</i>	<i>93</i>
<i>FIGURA 4-1: Montaje general.....</i>	<i>96</i>

<i>FIGURA 4-2: Guía de onda WR284 a) Vista total, b) SiC, c) Aire.</i>	97
<i>FIGURA 4-3: Distribución del campo eléctrico al interior de la guía.</i>	98
<i>FIGURA 4-5: Pérdida de densidad de potencia.</i>	99
<i>FIGURA 4-6: Posibles configuraciones geométricas de material dieléctrico.</i>	101
<i>FIGURA 4-7: Distribución de temperatura de varios modelos geométricos.</i>	102
<i>FIGURA 4-8: Cambio de condiciones de frontera para menor tiempo de procesamiento el análisis de temperatura.</i>	103
<i>FIGURA 4-9: Nuevas condiciones de frontera.</i>	104
<i>FIGURA 4-10: Energía concentrada alrededor de los bordes del material dieléctrico. Escala Reducida.</i>	105
<i>FIGURA 4-11: Temperatura del carburo de silicio ubicado en una guía de ondas rectangular. Escala aumentada.</i>	106

LISTA DE ANEXOS

Anexo A DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE CST STUDIO SUITE™.....	115
---	-----

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE GUÍAS DE ONDA PARA EL CALENTAMIENTO DE MATERIALES CON MICROONDAS*

AUTOR:

FABIÁN DAVID SOLANO TORRADO**

PALABRAS CLAVES: Microondas, Guías de ondas, Guías rectangulares, Guías circulares, Calentamiento con microondas, Carburo de Silicio, modos TE y TM.

DESCRIPCIÓN:

En la búsqueda de oportunidades que permitan incrementar la eficiencia en que los materiales dieléctricos son calentados, se ha establecido con un alto grado de confiabilidad mediante diseño y simulación, la elección más apropiada de la guía de onda implementada en el proceso de calentamiento de materiales dieléctricos, como el carburo de silicio (SiC), con microondas. Presentando una base teórica del calentamiento con microondas y su interacción con los materiales para mostrar el grado de atenuación que implica implementar este tipo de calentamiento al interior de guías de ondas circulares y rectangulares; además se muestra la importancia que representa la forma geométrica del material en el interior de la guía, así como el tamaño y la distancia entre la fuente de las microondas y el material, con el fin de elevar la eficiencia en el proceso de calentamiento y en el grado de atenuación de la radiación electromagnética.

La metodología de investigación incluyó el desarrollo individual de cada objetivo de acuerdo a lo planteado en el plan de trabajo, incluyendo una revisión minuciosa del estado del arte al respecto.

En conclusión se desarrolló un análisis conceptual que permitió determinar que guía de onda es más apropiada para el calentamiento de materiales dieléctricos a una frecuencia de 2.45 GHz, presentando una descripción del cómo y el porqué escoger los parámetros más adecuados que determinan la propagación del modo electromagnético principal de operación con mínima atenuación en una guía de onda.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Carlos Rodrigo Correa Cely PhD.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND SIMULATION OF WAVEGUIDES FOR THE HEATING OF MATERIALS USING MICROWAVES *

AUTHOR:

FABIÁN DAVID SOLANO TORRADO**

KEY WORDS: Microwaves, Waveguide, Rectangular Guides, Circular Guides, Microwave Heating, Silicon Carbide, Modes TE y TM. .

DESCRIPTION

In the search for ways that allow to increase the efficiency in dielectric materials heating, it has been established with a high degree of reliability by means of design and simulation, the most suitable choice of the waveguide implemented in the process of heating dielectric materials, such as silicon carbide (SiC), using microwaves. Presenting a theoretical base of the heating with microwaves and its interaction with the materials to show the degree of attenuation that is reached when implementing this type of heating in the interior of rectangular and circular waveguides; also, the importance of the geometric form of the material in the interior of the guide is shown as well as the size and the distance between the source of the microwaves and the material, in order to increase the efficiency of the heating process and the degree of attenuation of the electromagnetic radiation.

The investigation methodology included the development of each objective according to what was proposed in the work plan, including a meticulous revision of the state of the art on the matter.

In conclusion, a conceptual analysis was developed, which allowed to determine what waveguide is more appropriate for the heating of dielectric materials at a frequency of 2,45 GHz, presenting a description of how and why to choose the most suitable parameters that determine the propagation of the main electromagnetic mode of operation with minimum attenuation of a waveguide.

* Undergraduate projet.

** Physiomechanical Engineering Faculty, Electric Electronic and telecommunications School.

Director: Carlos Rodrigo Correa Cely PhD.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento de materiales es estudiado y analizado como uno de los parámetros más importantes en el procesamiento de sistemas, abarcando un amplio rango de aplicaciones; por esto, las alternativas de calentamiento viables económicas y eficientes se ha dirigido hacia el calentamiento con microondas. Las microondas, como cualquier fuente de energía, pueden tener un gran número de aplicaciones. Sin embargo, lo verdaderamente importante es siempre la aplicación. Ésta debe resolverse de forma eficiente empleando para ello toda la tecnología disponible.

Parece evidente, para cualquier situación realista en la que se quiera estudiar los campos electromagnéticos, que deban existir límites físicos. En estos casos las soluciones para los campos en el medio no podrán ser en general ondas planas uniformes de extensión infinita, ya que, además de satisfacer las ecuaciones de Maxwell deben cumplir las condiciones de frontera en los límites de la región que se considera; así se adentra en el grado de confinamiento de los campos como por ejemplo en las guías de onda que pueden ser definidas como una estructura destinada a la propagación dirigida y acotada de radiación electromagnética.

Lograr establecer que estructura es la más eficiente al radiar las ondas electromagnéticas en un determinado proceso, es necesario escoger correctamente los parámetros que influyen en ella. Para realizar una buena elección de éstos, es fundamental tener los conocimientos básicos acerca de ondas electromagnéticas, guías de onda, las distintas formas de propagación de los campos eléctricos y magnéticos a través de la estructura, como de las ecuaciones de Maxwell; y así disponer de un sistema que proporcione un óptimo desempeño en cualquier proceso que se requiera estudiar.

Este trabajo apunta hacia el diseño y simulación de guías de onda principalmente de área transversal, cilíndrica y rectangular, analizando las relaciones entre sus parámetros, escogiendo las dimensiones apropiadas para analizar los efectos de introducir un material como el carburo de silicio, (SiC), utilizando una herramienta de software enfatizado en el análisis y diseño electromagnético en el rango de alta frecuencia.

El presente trabajo inicia con la presentación de la metodología empleada para su ejecución, seguido de un conocimiento previo del estado actual del arte, de donde se desprende la necesidad de dar un soporte conceptual básico de microondas e interacción con la materia, dado en el primer capítulo. En el segundo capítulo se presenta el planteamiento del problema donde se exhibe la teoría fundamental de las guías de onda, como del carburo de silicio (SiC).

En el tercer y cuarto capítulo se presenta el diseño y simulación de guías de onda utilizadas en el calentamiento de materiales y el modelado del SiC (carburo de silicio) dentro de una guía de onda rectangular; se finaliza con las Conclusiones, Recomendaciones y Anexos.

METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de este trabajo de grado aparece en la figura 0-1, donde se muestra cada una de las etapas a seguir, dando inicio a una extensa y profunda consulta bibliográfica, sobre todo lo referente con guías de onda, microondas y calentamiento con microondas, para conocer más a fondo el estado del arte.

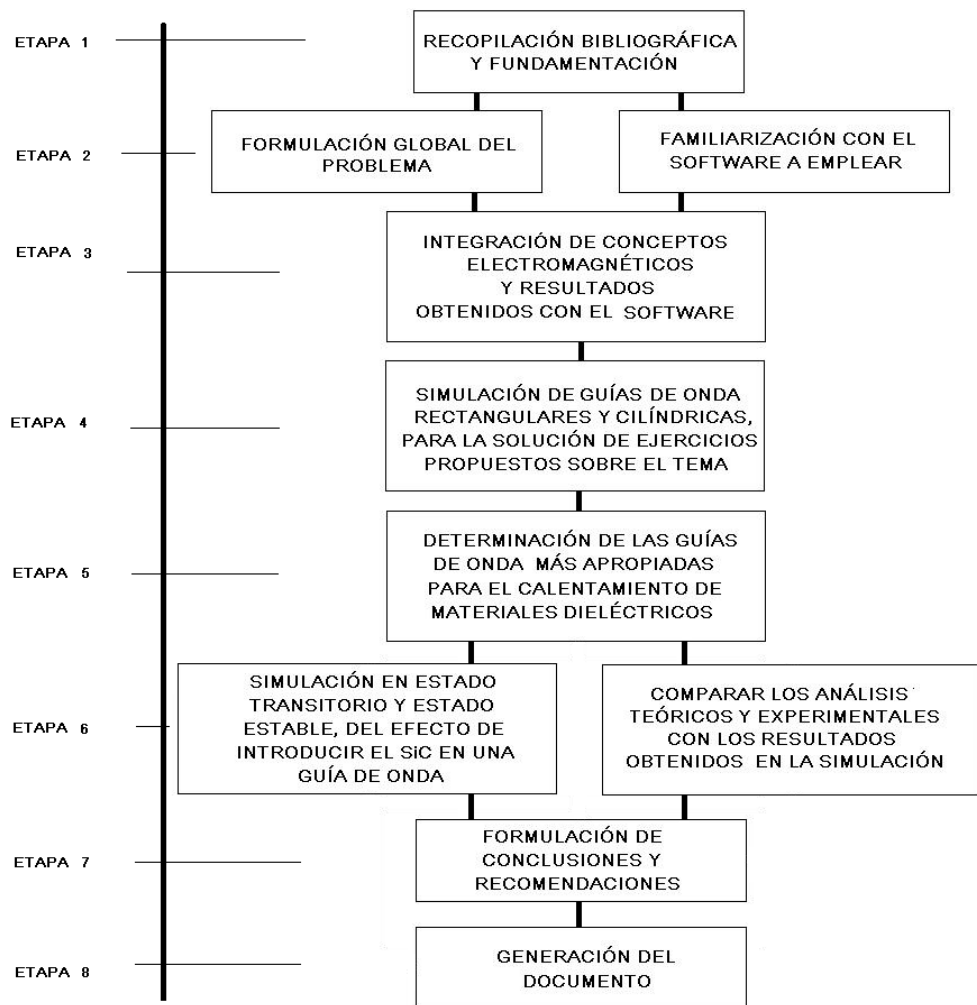


FIGURA 0-1: Metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo.

Fuente autor.

Basándose en los tipos de guías de onda mas utilizadas en la industria y en la investigación se realizarán simulaciones; se compararán los resultados en estas, con los resultados teóricos encontrados en la literatura para comprobar como los problemas de la vida real son llevados a la simulación. Y ya con la experiencia adquirida se escogerá la guía de onda más apropiada para el calentamiento de materiales dieléctricos. En este punto se sabrá que guía de onda da lo mejores resultados con fines de calentamiento; entonces se probará introduciendo el carburo de silicio SiC, para contrastar los resultados experimentales reportados en la literatura.

Se condensarán experiencias, resultados obtenidos, conocimientos adquiridos y recopilados en forma de conclusiones y recomendaciones, para futuros trabajos que pretendan abordar nuevos problemas con el diseño y la simulación de guías de onda para el calentamiento de materiales.

1. CONOCIMIENTO PREVIO

En los métodos convencionales de calentamiento, el tiempo de proceso está limitado por la tasa de flujo del calor dentro del material desde la superficie y determinado calor específico, conductividad térmica, densidad y viscosidad. El calentamiento de la superficie no sólo es lento, sino también no uniforme con las superficies del material. En consecuencia, la calidad de los materiales con calentamiento convencional es variable y con frecuencia inferior a los resultados deseados, llevando a un tratamiento imperfecto que conduce a un rechazo del producto y derroche de energía.

Por estas razones se esta implementando hace ya varios años en la industria el calentamiento con microondas, siendo un método rápido y eficiente el cual se muestra cuando se aplica energía electromagnética en el rango de 300 MHz a 300 GHz para calentar materiales. La mayoría de las aplicaciones operan solo en el rango de 915 MHz ó 2,45 GHz para evitar la interferencia con las frecuencias de radar y de telecomunicaciones **[AFH63]**; de este modo se dan importantes ventajas sobre los métodos convencionales en la reducción de tiempo de proceso, con un mínimo de impacto ambiental. Esto se debe a que algunos sistemas convencionales son muy voluminosos, no son fáciles de operar, pueden contaminar el medio ambiente debido a emisiones nocivas y generalmente llegan a ser muy ineficientes energéticamente.

De manera similar a la luz, las microondas son reflejadas, transmitidas o absorbidas por los materiales en sus trayectorias. Los materiales metálicos

reflejan totalmente este tipo de ondas mientras que los materiales no metálicos como el vidrio y algunos plásticos son mayormente transparentes a las mismas.¹

Es posible encontrar hoy en día una gran variedad de materiales, a los que se les puede tratar con microondas, ya que son particularmente susceptibles a su procesamiento; como también hay otros materiales en que el tratamiento material-microonda es muy difícil para la tecnología actual.

Este principio de calentamiento está basado principalmente, en las diferencias de comportamiento que manifiesta una onda electromagnética al atravesar un medio dieléctrico, con o sin pérdidas. Las características dieléctricas de los elementos a tratar, además de la capacidad de absorción de las microondas, viene dada por dos parámetros electromagnéticos: constante dieléctrica ϵ' y tangente de pérdidas $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ [MET93].

Calentar con microondas difiere de los otros métodos convencionales, las microondas excitan las moléculas en el interior de la muestra, calentando todo el volumen de material. En general, la temperatura de la superficie de una muestra es ligeramente inferior debido a las pérdidas por evaporación, convección, conducción y radiación. Estas pérdidas por el medio ambiente circundante pueden ser reducidas usando calentamiento híbrido, que emplea los denominados "suceptores". Los suceptores son materiales como el carburo de silicio, que absorbe eficientemente la energía de las microondas, y se convierte en calor, que a su vez es irradiado nuevamente sobre la muestra. Los suceptores son utilizados también para ayudar al calentamiento a bajas temperaturas, cuando la absorción de las microondas es baja.

Frecuentemente, el aspecto económico demanda que el proceso de elaboración o, de estudio de un producto, sea llevado a cabo en el menor intervalo de tiempo

¹ Ver interacción de las microondas con los materiales.

posible y que el calentamiento de los materiales sea el mas efectivo posible; estas son algunas de las razones del porque utilizar el calentamiento con microondas.

Como en muchos aspectos tecnológicos implementados hoy en día la simulación de sistemas es una de las mas grandes herramientas con las que cuenta la ingeniería; se utiliza para representar procesos mediante herramientas computacionales con el fin de diseñar un modelo de un sistema real, para así comprender su comportamiento o evaluar nuevas estrategias para su funcionamiento.

CST Studio suite™ (Tecnología de Simulación por computadora) es una de estas herramienta de software para simulaciones, especializada en el análisis electromagnéticos en todas las bandas de frecuencia. Esta herramienta en particular contiene a CST MICROWAVE STUDIO ® y CST EM STUDIO™, donde en conjunto se puede estudiar las ondas electromagnéticas de alta frecuencia y su respectivo efecto de calentamiento al interactuar con los materiales. Las aplicaciones incluyen problemas estacionarios, baja y alta frecuencia, entre los cuales se encuentran: acopladores, filtros, estructuras planares, conectores, todo tipo de antenas, inductores, condensadores, guías de onda, fuentes de plasma, dispositivos ópticos, sensores, unidades de grabación, actuadores, motores, frenos electromagnéticos entre otras, las figuras 0-1 a 0-3 ilustran algunos de estos ejemplos.

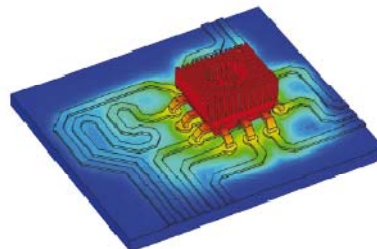


FIGURA 0-2: Distribución de la temperatura, debido a las pérdidas de electricidad en un circuito integrado.

Fuente: www.cst.com



FIGURA 0-3: Simulación del campo electromagnético, (Far-field) de una antena en un helicóptero. Aplicación militar.

Fuente: www.cst.com

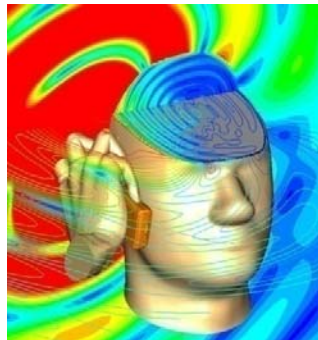


FIGURA 0-4: Distribución del campo eléctrico en el sistema global para comunicaciones móviles (GMS) en la banda de frecuencias de 1,8GHz.

Fuente: www.cst.com

1.1. SOPORTE CONCEPTUAL

1.1.1. GENERACIÓN DE MICROONDAS

Las microondas se generan teniendo en cuenta la potencia liberada y la frecuencia de operación. Actualmente se pueden conseguir en el mercado gran variedad de generadores de microondas, destacándose entre ellos, el magnetrón, el cual presentan un excelente desempeño en relación a potencia liberada, frecuencia, eficiencia y costo.

El magnetrón es un tubo de sección circular que contiene un ánodo cilíndrico y un cátodo de tungsteno a lo largo del eje. La separación entre el ánodo y el cátodo define la llamada región de interacción, donde existen numerosas cavidades resonantes. Se aplica una diferencia de potencial constante entre el ánodo y el cátodo. Consiguiendo varios kilovoltios por cada pocos milímetros. De este modo se genera un campo magnético que será paralelo al eje del tubo, mediante imanes permanentes o por electroimanes. La presencia de este campo interactúa con la carga en los electrones y los hace rotar sobre el cátodo. Cuando se combina el potencial eléctrico y el campo magnético los electrones viajan en forma casi cicloidal, ya que la proximidad al ánodo varía, producido por el espaciado periódico de las cavidades. La aceleración periódica de los electrones en la proximidad de las cavidades resonantes del ánodo induce un campo periódico de radio frecuencias en la región de la cavidad. Un exceso de energía de radio frecuencias es tomado por una unidad de acoplamiento, encargado de transmitir esa energía

1.1.2. ASPECTOS GENERALES

La radiación de microondas tiene las mismas propiedades de otras ondas del espectro electromagnético. Son radiaciones no ionizantes, esto es, que no modifican la estructura electrónica del material, por lo que el resultado de su interacción es de origen térmico o de conversión de una forma de energía en otra. Las microondas, debido a las características propias de la radiación electromagnética pueden ofrecer, en muchas ocasiones, la alternativa más viable en términos de eficiencia energética, uniformidad en la distribución de humedades y calidad en el producto final, debido a sus características únicas, no disponibles en ningún método convencional, tales como:

- **Penetración de la radiación:**

La energía electromagnética reacciona de manera diferente en función de su frecuencia y del material con el que entra en contacto; así el nivel de penetración de la radiación electromagnética es inversamente proporcional a su frecuencia de operación. Cuando la energía electromagnética es de baja frecuencia, atraviesa limpiamente las barreras a su paso y cuando es de alta frecuencia reacciona más con los materiales que tiene a su paso. En función de la frecuencia, las ondas electromagnéticas pueden no atravesar medios conductores. Esta es la razón por la cual los teléfonos móviles se queden sin cobertura dentro de una caja de metal. Sin embargo, como la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma, cuando una onda electromagnética choca con un conductor pueden suceder dos cosas. La primera es que se transformen en calor: este efecto tiene aplicación en los hornos de microondas. La segunda es que se reflejen en la superficie del conductor (como en un espejo).

- **Calentamiento rápido.**

La energía electromagnética es convertida en calor por fricción intermolecular, directamente al interior de la muestra acelerando el proceso; mejorando los

métodos convencionales de calentamiento donde el calor entra en la muestra por la superficie y es transferido hacia el centro por conducción térmica.

- **Calentamiento selectivo del material.**

Una de las más amplias y usadas características de procesamiento con microondas es la fácil interacción entre la microondas y los materiales con un gran rango de respuestas dieléctricas y habilidades para absorber las microondas, como por ejemplo el agua. Esta característica permite la utilización de las microondas en el calentamiento y procesamiento de alimentos, secado y deshidratación de una gran variedad de productos [FAT95].

- **Reacciones autolimitadas.**

La interacción de las microondas con la materia produce una elevación de temperatura sólo si la misma posee dipolos eléctricos o tiene posibilidad de que sean inducidos. Por ello, la utilización de las microondas implica un conocimiento de determinadas características de los materiales a tratar, tales como sus propiedades dieléctricas a elevadas temperaturas, y en general la respuesta a radiaciones de distintas frecuencias.

- **Eficiencia energética**

La fracción de potencia irradiada (como la generada por un magnetrón) que es absorbida por un material depende de las características de acoplamiento de este, del número y arreglo de los componentes de la cavidad y del diseño de esta última. Una cierta cantidad de potencia se refleja por toda la cavidad. La energía absorbida es la diferencia de la energía suministrada por el magnetrón y la reflejada en la cavidad.

- **Ahorros a partir de cambios de procesamiento**

Si se observan mejoras en las propiedades de los materiales al compararse con el método tradicional de su procesamiento, es de esperarse que se tengan implicaciones económicas muy positivas. Existe una gran cantidad de reportes en

la literatura que indican un sustancial ahorro en tiempo y mejoras en la productividad utilizando el procesamiento con microondas. Se puede tener ahorros adicionales debido al espacio de la planta, cantidad de equipo, inventario, así como en personal.

Estas características únicas constituyen beneficios que no se disponen en métodos de procesamiento, ofreciendo opciones para el tratamiento de una amplia variedad de materiales. Las características de las microondas también introducen nuevos problemas y desafíos.

1.1.3. INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON LOS MATERIALES

El uso de las microondas a nivel industrial proporciona una versátil herramienta para procesar muchos tipos de materiales bajo una amplia gama de condiciones. Cuando las microondas interactúan con un material, estos pueden ser clasificados de acuerdo a su respuesta ante exposición. A saber, una clasificación de los materiales, de acuerdo a su comportamiento frente a un campo de microondas, es:

- Reflejantes, Figura 1.1-1, donde no existe penetración en el material, un ejemplo de este tipo de materiales son los metales.

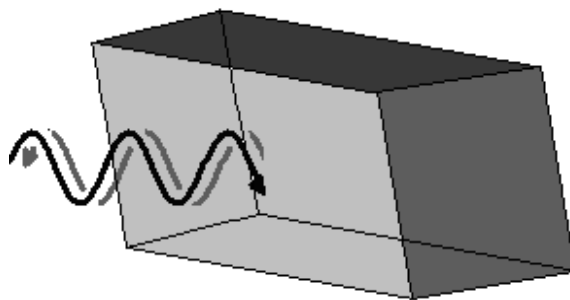


FIGURA 0-1: Respuesta de un material reflejante (opaco) a las microondas.

Fuente: autor.

- Absorbentes, Figura 1.1-2, en este tipo de materiales la radiación electromagnética es absorbida parcial o totalmente, generándose calentamiento con cierta facilidad. Son materiales dieléctricos de cargas poco ligadas o muy polares.

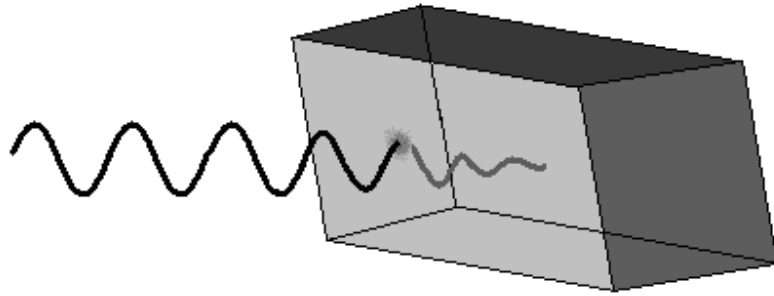


FIGURA 0-2: Respuesta de un material reflejante (opaco) a las microondas.

Fuente: autor.

- Transparentes, Figura 1.1-3, en este tipo de materiales la radiación electromagnética penetra totalmente. Representados por los materiales dieléctricos de cargas muy ligadas o poco polares (aislante).

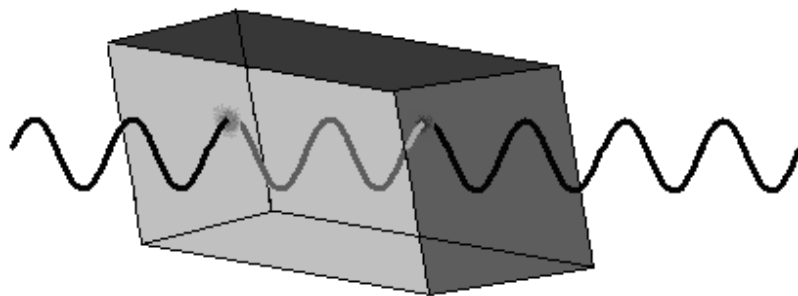


FIGURA 0-3: Respuesta de un material transparente a las microondas.

Fuente: autor.

Entendiendo que la absorción se manifiesta como una generación de calor en el material, se han propuesto diversas tesis para la explicación física de la absorción de microondas: la rotación bipolar, calentamiento resistivo, calentamiento electromagnético y calentamiento dieléctrico. Dependiendo de la sustancia, la respuesta puede ser exclusivamente de un mecanismo o una combinación de ellos. Cuando las ondas son absorbidas por el material los dipolos existentes o los inducidos se ponen en acción, esto es, vibran y rotan, produciendo energía térmica en todo el seno del materia, básicamente por fenómenos de fricción a nivel atómico-molecular. Si el material es un dieléctrico bipolar, la absorción de la radiación es máxima. Si son conductores del calor, disipan muy rápido la energía y por tanto, no permiten que haya calentamiento interno. En los conductores metálicos los electrones se mueven libremente en respuesta al campo externo, generando un campo propio, de ahí que reflejen las microondas, por lo que no se calientan tampoco. En los aislantes, los electrones no se mueven libremente, pero la reorientación electrónica ó distorsión de los dipolos inducidos o permanentes pueden llevar al calentamiento. Los materiales cerámicos de naturaleza dieléctrica (aislantes eléctricos) son transparentes a las microondas a temperatura ambiente, pero por encima de una temperatura crítica, estos materiales comienzan a absorber la misma de manera más eficiente.

1.1.4. PROPAGACIÓN EN DIELECTRICOS

Las microondas como método de calentamiento han sido ampliamente utilizadas en la síntesis y procesamiento de los materiales. Para entender las manifestaciones de un material dieléctrico cuando se expone a radiación electromagnética, y la variación energética que sufre el mismo, es necesario conocer el comportamiento de las propiedades eléctricas y magnéticas del material. Las propiedades dieléctricas y magnéticas del medio, rigen la propagación de la microondas sobre cualquier material. En el medio las

propiedades electromagnéticas son caracterizadas mediante la permitividad compleja (ϵ) y la permeabilidad compleja (μ) definidas como:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \text{ y } \mu = \mu' - i\mu'' \quad (1)$$

La componente real de la permitividad compleja ϵ' no es una constante en el sentido estricto de la palabra sino que varía significativamente con la frecuencia y con la temperatura. La componente imaginaria de la permitividad ϵ'' es el factor dieléctrico de pérdida. En forma similar la componente imaginaria de la permeabilidad compleja μ'' es el factor magnético de pérdida. La conductividad eléctrica, (σ) la permitividad eléctrica, (ϵ) y la permeabilidad magnética, (μ) son las tres propiedades, eléctricas y magnéticas, del material que están directamente relacionadas con el campo electromagnético.

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica (σ) es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También se define como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él; varía con la temperatura.

Los materiales pueden ser clasificados, de acuerdo con la conductividad, en conductores o metales, semiconductores y no conductores o aislantes (dieléctricos). En general, en los metales la conductividad es muy alta ($\sigma \gg 1$), en los dieléctricos muy baja ($\sigma \ll 1$) y en los semiconductores se encuentra en una región intermedia entre los conductores y aislantes. En los metales, generalmente, un decremento en la temperatura produce un incremento de la conductividad. Es importante tener presente que la conductividad varía, especialmente en aplicaciones de calentamiento con microondas o RF.

$$\sigma(T) = \sigma(T_0)e^{0,02(T-T_0)} \quad (2)$$

donde $\sigma(T_0)$, es la conductividad a la temperatura de referencia T_0 en °C.

Muchas veces a incrementos de la temperatura se genera un incremento en la densidad de potencia local, generando así un nuevo incremento en la temperatura; esto se debe a que existe un fenómeno de realimentación positiva cuando la variación de la conductividad es considerable. Este fenómeno de realimentación positiva es conocido como calentamiento incontrolado (Thermal runaway).

- **Permeabilidad magnética**

Se denomina permeabilidad magnética (μ) a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.

Para comparar entre sí los materiales, se entiende la permeabilidad magnética absoluta (μ) como el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la permeabilidad magnética de vacío (μ_0):

$$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (3)$$

donde μ_r es la permeabilidad relativa al espacio libre (adimensional), μ_0 permeabilidad al espacio libre ($4\pi 10^{-7} [H/m]$) y χ_m susceptibilidad magnética (adimensional).

Los materiales se pueden clasificar según su permeabilidad magnética relativa en:

- ferromagnéticos, cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1.
- paramagnéticos o no magnéticos, cuya permeabilidad relativa es aproximadamente 1 (se comportan como el vacío).
- diamagnéticos, de permeabilidad magnética relativa ≈ 1 .

Los materiales *ferromagnéticos* atraen el campo magnético hacia su interior. Son los materiales que "se adhieren a los imanes". Esa propiedad recibe el nombre de ferromagnetismo. Ejemplos de ellos son el hierro y el níquel.

Los materiales *paramagnéticos* son la mayoría de los que encontramos en la naturaleza. No presentan ferromagnetismo, y su reacción frente a los campos magnéticos es muy poco apreciable.

Los materiales *diamagnéticos* cuando se exponen a un campo magnético, estos materiales inducen a su vez un campo magnético débil en la dirección opuesta. Es decir rechazan débilmente a un imán fuerte. En otras palabras, en vez de absorber las líneas de fuerzas magnéticas (como las ferromagnéticas), estos materiales las repelen. En general, esta acción diamagnética es muy débil, y no es comparable al efecto que produce el campo magnético sobre los materiales ferromagnéticos. Un ejemplo de material diamagnético es el cobre.

Otro efecto de los campos magnéticos sobre los materiales es el anti-ferromagnetismo, que resulta en una polarización nula del material, pero produce una ordenación interna de éste.

- **Permitividad eléctrica**

La permitividad, también llamada permitividad eléctrica (ϵ) es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Esta constante es aproximadamente igual a $8,85 \times 10^{-12}$ farad por metro (F/m) en el espacio libre. En otros materiales puede ser muy diferente, considerablemente mayor que el valor en el espacio libre, el cual es simbolizado por (ϵ_0).

La permitividad es determinada por la habilidad de un material de polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado y, de esa forma, cancelar parcialmente el campo dentro del material.

En aplicaciones de ingeniería, permitividad a menudo se expresa en términos relativos, más que en cifras absolutas, los términos. Si (ϵ_0) representa la permitividad de espacio libre (es decir, $8,85 \times 10^{-12}$ F / m) y (ϵ) representa la permitividad de la sustancia en cuestión (especificado también en (F/m)), entonces la permitividad relativa, (ϵ_r) , viene dada por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4)$$

La constante dieléctrica es una magnitud característica de una determinada sustancia dieléctrica, a veces llamado la permitividad relativa. Se define la permitividad a través de una cantidad compleja, con la parte real dada por las propiedades reflexivas de la superficie (coeficientes de reflexión de Fresnel), la permitividad dieléctrica del material, y la parte imaginaria dada por el coeficiente de absorción, el cuál involucra las pérdidas en el material.

En el Sistema Cegesimal de Unidades, también llamado Sistema CGS la permitividad viene dada por:

$$\epsilon = 1 + 4\pi\chi_e \quad (5)$$

La susceptibilidad eléctrica χ_e es esencialmente la constante de proporcionalidad que relaciona la permitividad del medio estudiado respecto al del vacío, en el sistema MKS (Sistema Métrico Decimal):

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e) \quad (6)$$

1.1.5. TEOREMA DE POYNTING

El teorema de Poynting proporciona una relación cuantitativa entre las intensidades eléctricas y magnéticas en un punto dado del frente de onda y la energía por unidad de superficie que se propaga.

En el análisis de calentamiento de materiales con microondas es importante saber como la onda electromagnética logra calentar el material cuando interactúa con él; para ello es fundamental conocer el teorema de Poynting. La manera más directa de referirse a este teorema es mediante el vector de Poynting (P), así, para conocer el valor de este vector, se asume que las ondas de campo eléctrico (E) y campo magnético (H) se ajustan al sistema de ejes coordenados, como lo muestra la Figura 1.1-4.

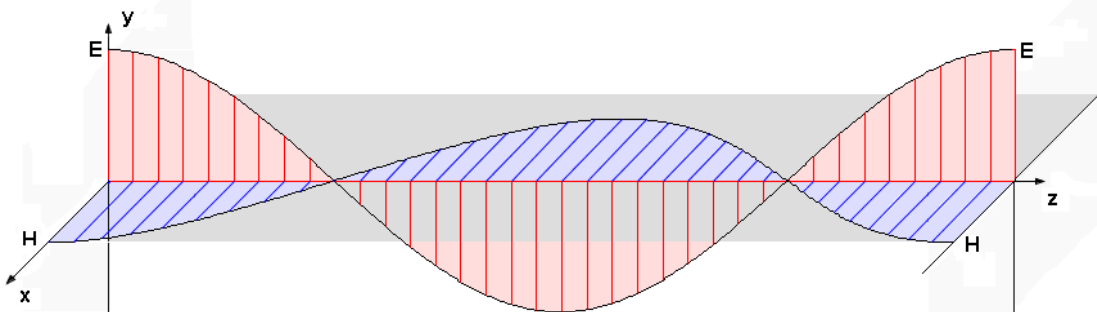


FIGURA 0-4: Onda eléctrica y magnética en un instante de tiempo, ubicadas en el sistema de coordenadas x, y y z.

Fuente: autor.

Cuando esta onda electromagnética es observada a través de un dieléctrico, la energía almacenada por unidad de volumen, es de la forma:

$\mathfrak{S}_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2$ donde \mathfrak{S}_e , es la energía eléctrica almacenada por unidad de volumen.

$\mathfrak{S}_m = \frac{1}{2} \mu H^2$ donde \mathfrak{S}_m , es la energía magnética almacenada por unidad de volumen. De esta manera la energía total por unidad de volumen es:

$$\mathfrak{S} = \mathfrak{S}_e + \mathfrak{S}_m = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (7)$$

Ahora, si se observa la dirección en la cual están trasladándose las ondas E y H, Figura 1.1-4, la ecuación (7) se puede mostrar como:

$$\mathfrak{S} = \frac{1}{2} (D_y E_y + B_x H_x) \quad (8)$$

donde, $D = \varepsilon E$ y $B = \mu H$ son la densidad de flujo eléctrico y densidad de flujo magnético respectivamente. Si se imagina que el material, está siendo afectado por las ondas E y H, moviéndose hacia la dirección positiva de z con una velocidad (v) la potencia por unidad de área es:

$$P_z = v_z \mathfrak{S} \quad (9)$$

reemplazando (8) en (9), se tiene:

$$P_z = \frac{v_z}{2} (D_y E_y + B_x H_x) \quad (10)$$

así, como $v_z D_y = H_x$ y $v_z B_x = E_y$ la (9) se muestra de la siguiente manera:

$$P_z = E_z H_x$$

(11)

P_z representa el vector de poynting para la Figura 1.1-4, pero de manera general el vector de poynting es, $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$.

[GEO50].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, los sistemas de secado hacen uso de equipos de vacío y de grandes superficies para la reducción del 50% al 12/14% de porcentaje de humedad aproximadamente. Frecuentemente, la situación económica demanda que el proceso sea llevado a cabo en el menor tiempo posible; sin embargo, las diferentes tentativas en acelerar el proceso de calentamiento a través de métodos convencionales pueden acarrear diferentes problemas que limitan mucho la eficiencia de este tipo de energías. Las microondas, debido a las características propias de la radiación electromagnética descritas en apartados posteriores, pueden ofrecer, en muchas ocasiones, la alternativa más viable en términos de eficiencia energética, uniformidad en la distribución de humedades y calidad en el producto final. Para tener en cuenta un comportamiento real del proceso de calentamiento con microondas es necesario considerar las propiedades físicas de los materiales reales (no idealizados) involucrados. Una guía de ondas debe ser considerada como un buen conductor con conductividad finita, $\sigma_c = finita$ y el material dieléctrico como imperfecto, aunque pequeña, $\sigma \neq 0$.

En la actualidad la simulación es una de las herramientas de análisis más poderosas, utilizada en cualquier área de investigación que se dedique al diseño y análisis de procesos o sistemas realmente complejos. Basados en una herramienta tan importante es posible representar modelos reales, con los cuales se puede experimentar, en casos en los que la ejecución física sería impráctico o inapropiado debido a que esto llevaría muy posiblemente a pérdidas de tiempo y dinero, e incluso a situaciones de alto riesgo.

El presente trabajo de investigación aborda la tarea de diseñar y simular las guías de onda mas apropiadas en el proceso de calentamiento de materiales, mas específicamente guías de onda rectangulares y cilíndricas, cuya fuente de calor es la radiación electromagnética en la banda de las microondas, dando ejemplos de los posibles casos en que la mala elección de los parámetros de las guías llevan a resultados en que la propagación de la radiación es nula. De igual forma se mostrará el comportamiento del carburo de silicio, al exponerlo a microondas por medio de una guía de ondas rectangulares la cual como se verá mas adelante es quien ofrece la menor atenuación que las guías cilíndricas, característica esencial en la propagación de las ondas electromagnéticas. Para poder dar solución al problema planteado es necesario e imprescindible tener una fundamentación teórica de guías de onda, características principales, modos de propagación, pérdidas, factor de calidad, al igual conocer el carburo de silicio y sus propiedades.

2.1. GUÍAS DE ONDA

Nombre designado a las estructuras que consisten de un solo conductor de sección rectangular, circular o elíptica, para el transporte de energía electromagnética, Figura 2-1. Las paredes de las guías confinan la onda en el interior por reflexión en la superficie, beneficiándose del comportamiento de los materiales “opacos” ante las microondas; generalmente una guía contiene un dieléctrico tal como el aire. De esta manera la transmisión de la energía se hace por medio de este que encierra las paredes de la guía.

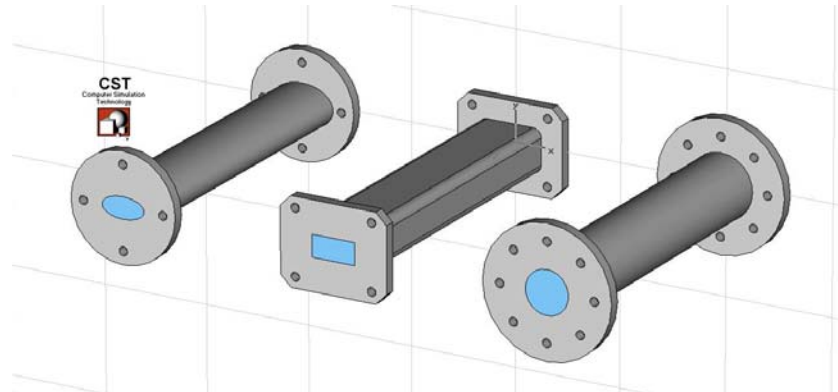


FIGURA 2-1: Guías de onda elíptica, rectangular y cilíndrica.

Fuente: autor.

Es posible hacer una comparación de las guías de onda y otras líneas de transmisión para observar algunas ventajas y desventajas en el empleo de este tipo de estructuras.

2.1.1. Ventajas

Las guías de onda presentan varias ventajas sobre las líneas de transmisión de dos cables y coaxiales. Por ejemplo, la gran superficie de las guías de onda reduce enormemente las pérdidas (I^2R) del cobre. Las líneas de transmisión de dos cables de cobre tienen grandes pérdidas porque tienen una superficie relativamente pequeña. La superficie del conductor externo de un cable coaxial es grande, pero la superficie del conductor interno es relativamente pequeña. La capacidad de manejo de potencia es otra ventaja de las guías de onda. Guías de onda puede manejar más potencia que las líneas coaxiales del mismo tamaño, dado que la capacidad de manejo de la potencia está directamente relacionada con la distancia entre los conductores. Las pérdidas por radiación son atenuadas debido al blindaje otorgado por la guía.

No hay pérdidas en el dieléctrico, pues generalmente las guías de onda contienen aire en su interior, lo cual significa que las pérdidas debida al dieléctrico sean

despreciables. Además, presenta una construcción más simple que un cable coaxial.

2.1.2. Desventajas

El tamaño físico es la principal limitación a bajas frecuencia de las guías de onda; el ancho de una guía de onda debe ser aproximadamente la mitad de longitud de onda en la frecuencia de la onda que se han de transportar. Esto hace que el uso de guías de onda a frecuencias relativamente bajas sea poco práctico. El rango bajo de frecuencias de cualquier sistema utilizando guías de onda está limitado por las dimensiones físicas de las guías de onda.

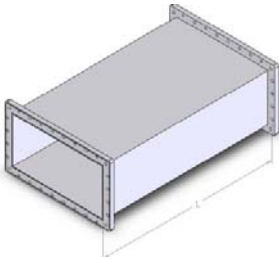
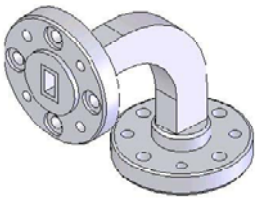
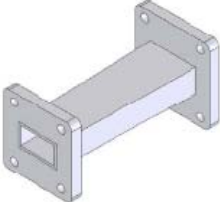
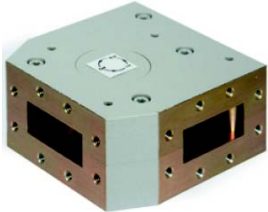
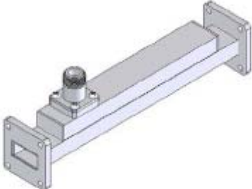

Otra importante desventaja se presenta en la complejidad de la instalación y operación de sistemas basados en este tipo de estructuras, Por ejemplo:

- Los radios de curvatura deben ser mayores a una longitud de onda (λ) para evitar atenuación.
- Considerando la dilatación y contracción con la temperatura, se debe sujetar mediante soportes especiales.
- Se debe mantener sujeta a presurización para mantener las condiciones de uniformidad del medio interior. **[3W1]**

En articulaciones son necesarios acoplamientos especiales para asegurar un correcto funcionamiento. Además, muchas veces para reducir pérdidas, las superficies internas de guías son recubiertos en oro o plata aprovechando las propiedades de estos materiales ante las pérdidas. Estos requisitos aumentan los costos y hacen que la implementación de los sistemas usando guía de onda sea poco viable.

2.2. TIPOS DE GUÍAS DE ONDAS

En la actualidad existen una gran variedad de formas para las guías de onda de sección rectangular, circular o elíptica. Las aplicaciones son muy diversas, como ejemplo se tienen filtros, acopladores direccionales, circuladores, entre otros. A continuación, en la Tabla 1 se muestran diferentes tipos guías de sección rectangular existentes.

<p>Guía de onda recta</p> 	<p>Guía de onda doblada</p> 
<p>Guía de onda de Transición</p> 	<p>Guía de onda circulador</p> 
<p>Acoplador de guía de onda</p> 	<p>Guía de onda de imitación de carga</p> 

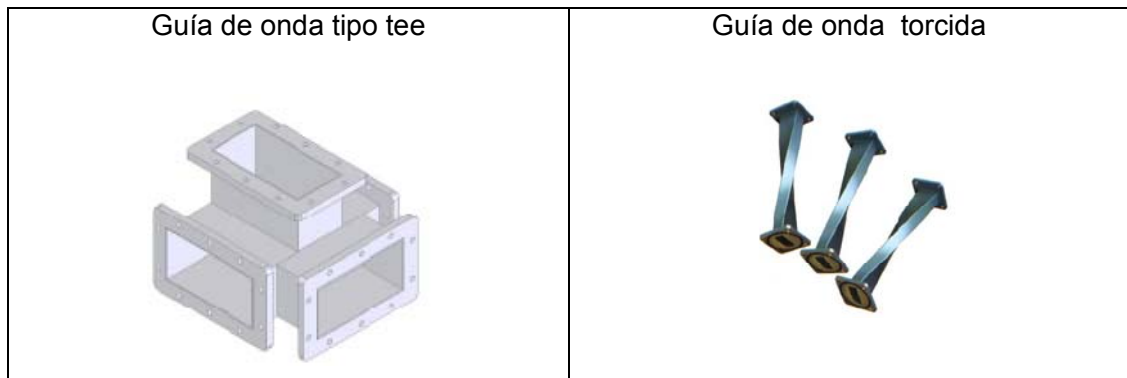


Tabla 1: Tipos de guías de onda.

Fuente: www.ainfoinc.com

2.3. IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE UNA GUÍA DE ONDA

La impedancia característica de una guía de onda depende de tres factores importantes como son:

- medio dieléctrico existente dentro de la guía,
- frecuencia de operación
- frecuencia de corte

Expresada matemáticamente como:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

(12)

Normalmente el dieléctrico existente dentro de una guía de onda es el aire, así que la impedancia cambiaría a:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

(13)

En general Z_0 se denomina impedancia característica y no varía su valor a lo largo de la guía de onda; esto es debido a que las frecuencias de operación permanecen constantes en un valor fijo para una aplicación específica.

2.4. MODOS DE OPERACIÓN EN UNA GUÍA DE ONDA

Una guía de ondas puede propagar, en teoría, un número infinito de tipos distintos de onda electromagnética. Cada uno de estos tipos o modos presenta una configuración distinta de campos eléctrico y magnético, y la denominación de cada modo obedece a esa configuración. Cada modo tiene una frecuencia crítica, debajo de la cual no se propagará.

Para un tamaño particular de guía de ondas, el modo correspondiente a la menor frecuencia de corte se denomina modo principal. Este será el único modo propagado si la frecuencia es mayor a la primera frecuencia de corte, pero menor a la frecuencia de corte del segundo modo. Así, la propagación de los modos va a estar ligada a las dimensiones de la guía de ondas y la frecuencia de operación.

En general en las líneas de transmisión de las microondas pueden existir tres maneras posibles de operación como son, (TEM) o transversal electromagnético, el cual necesita por lo menos dos conductores, (TE) o transversal eléctrica, y (TM) transversal magnética. En la onda TE el componente z del campo eléctrico no existe; de la misma manera, en una onda TM no existe el componente z del

campo magnético. En una guía de ondas cada onda TE y TM puede tener diferentes configuraciones. Estos modos son soluciones al encontrar $E_x(x, y)$ y $H_z(x, y)$ de las expresiones de los componentes del campo electromagnético, dadas a continuación:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{1}{K^2} \left(\gamma \frac{dE_z}{dx} + j\omega\mu \frac{dH_z}{dy} \right), & E_y &= -\frac{1}{K^2} \left(\gamma \frac{dE_z}{dy} - j\omega\mu \frac{dH_z}{dx} \right) \\ H_x &= -\frac{1}{K^2} \left(\gamma \frac{dH_z}{dx} - j\omega\varepsilon \frac{dE_z}{dy} \right), & H_y &= -\frac{1}{K^2} \left(\gamma \frac{dH_z}{dy} + j\omega\varepsilon \frac{dE_z}{dx} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

donde

$$K^2 = \gamma^2 + \omega^2 \varepsilon \mu$$

γ : Coeficiente de propagación.

ω : Frecuencia [rad/s].

Estas soluciones se dan cuando:

1. $E_z = 0$ y $H_z = 0$. Solo existen componentes transversales de la onda. Esta solución corresponde a la onda electromagnética transversal.
2. $E_z = 0$ y $H_z \neq 0$. Esta solución corresponde a la onda transversal eléctrica.
3. $E_z \neq 0$ y $H_z = 0$. Esta solución corresponde a la onda transversal magnética.

El único tipo de modo que puede existir y propagarse sin interferencia de los otros modos, es el modo fundamental, que es el menor de los modos que puede propagarse en una guía de ondas. La frecuencia de corte de cada uno de los modos depende de la geometría de la guía de onda. La elección para propagar un

modo en particular a una frecuencia en particular puede conseguirse mediante la elección apropiada de sus dimensiones y la elección adecuada del mecanismo para lanzar las ondas dentro de la guía.

2.5. GUÍAS DE ONDA RECTANGULAR

Este tipo de guía, es una línea de transmisión de un solo conductor, donde su estructura interna presenta una forma rectangular, como se muestra en la Figura 2-2; el medio en su interior suele ser generalmente aire, pero puede reemplazarse por cualquier material dieléctrico. Por este tipo de guía se pueden propagar únicamente los modos TE_{mn} y TM_{mn} , los cuales representan las distintas formas de propagación de las ondas eléctricas y magnéticas a lo largo de la estructura.

El tamaño mínimo de la guía para transmitir una frecuencia específica, es proporcional a la frecuencia de corte, f_c , como al modo de propagación, **(15)**.

$$f_c = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \cdot c$$

(15).

donde c es la velocidad de propagación de la luz; tanto m como n son subíndices de los modos particulares transversales, eléctrico y magnético, a y b son las dimensiones internas de la guía Figura 2-2.

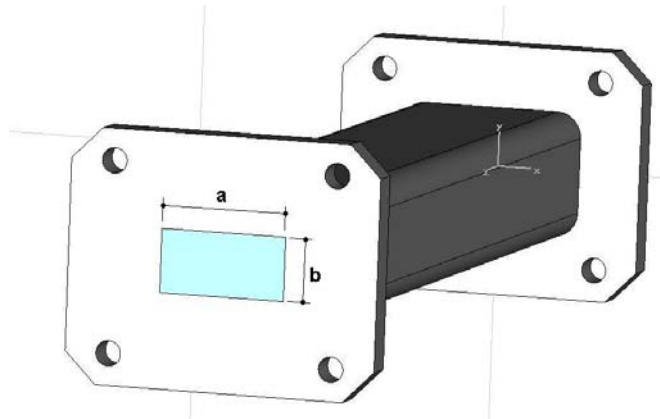


FIGURA 2-2: Dimensión interna de la guía de ondas rectangular.

Fuente: autor.

En cualquier caso, existe una frecuencia mínima que puede ser transmitida, denominada frecuencia de corte del modo principal de operación, con un ancho de banda específico, donde se pueden atenuar los demás modos de orden superior.

La longitud de onda de corte λ_c , es expresada matemáticamente como lo muestra la ecuación **(16)**, basado en la relación, $fc = c/\lambda_c$.

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \tag{16}$$

Otras características importantes de las ondas que se propagan dentro de la estructura son velocidad de fase (v_f) y la velocidad de grupo (v_g).

(v_f) es definida como la velocidad a la que una onda cambia de fase en una dirección paralela a una superficie conductora, **(17)**.

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2}}$$

(17)

donde,

f_0 , es la frecuencia de operación.

f_c , es la frecuencia de corte.

c es la velocidad de la luz.

Gráficamente la velocidad de fase se puede observar como ilustra la Figura 2-4 allí se puede apreciar como las flechas que representan la onda, cambian de dirección.

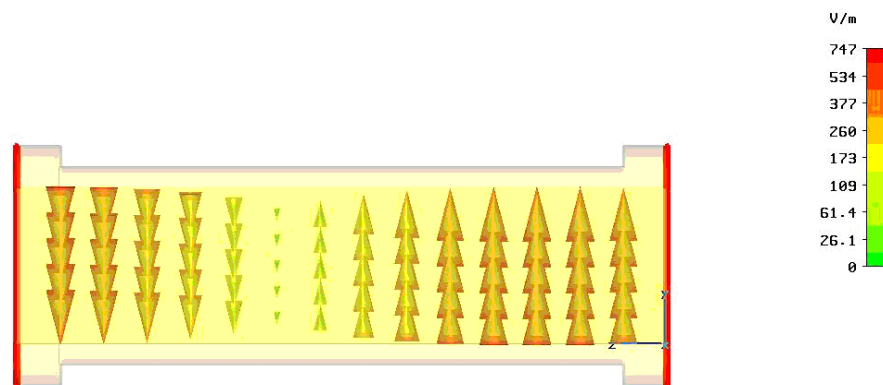


FIGURA 2-3: Representación de la velocidad de fase.

Fuente: autor.

La velocidad de grupo es expresada por medio de:

$$v_g = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (18)$$

Las expresiones anteriormente halladas como f_c , v_g , v_f , λ_c , son válidas para el modo transversal magnético TM y el modo transversal eléctrico TE en una guía de onda rectangular.

2.6. MODOS EN GUÍAS RECTANGULARES

Como se mencionó anteriormente, una guía de ondas rectangular solo puede propagar modos electromagnéticos tipo TE y TM, ya que al estar conformado de un solo material conductor es imposible que el modo TEM pueda propagarse.

2.6.1. Modo TE_{mn}

Este tipo de modo implica que la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es cero, muchas veces es llamado (H_{mn}). Las letras m y n son números enteros que representan el número de variaciones de medias longitudes de onda del campo en la dirección "a" para m y en la dirección "b" para n.

Tomando en cuenta que para el modo TE, las ondas en la dirección de propagación (z) son iguales a cero, $E_z = 0$, donde H_z es respuesta para este tipo de modos, entonces:

$$H_z(x, y, z) = H_z(x, y)e^{-j\beta z} \quad (19)$$

Así se tiene la ecuación de onda de Helmholtz, reducida a dos dimensiones es:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right)H_z(x,y) = 0 \quad (20)$$

Solucionando la ecuación diferencial **(20)** por el método de separación de variables, $H_z(x,y) = X(x)Y(y)$, se llega a:

$$-\frac{1}{X(x)} \frac{d^2X(x)}{dx^2} = \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2Y(y)}{dy^2} + h^2 \quad (21)$$

Basándose en este tipo de solución diferencial, cada término de la ecuación **(21)** debe ser expresado como una constante, ecuación **(22)**.

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2X(x)}{dx^2} = -k_x^2 \quad y \quad \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2Y(y)}{dy^2} = -k_y^2 \quad (22)$$

$$y \quad k_x^2 + k_y^2 = h^2 \quad (23)$$

Así se puede llegar a la solución general para $H_z(x,y)$, que puede ser escrita como

$$H_z(x,y) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y) \quad (24)$$

Ahora para poder hallar las constantes de la ecuación **(24)** se deben aplicar las condiciones de frontera del material, donde se ha supuesto que la guía se encuentra sobre el sistema de coordenadas de $x= 0$ a $x= a$, para la dimensión más larga y de $y= 0$ a $y= b$ para la dimensión más corta, así:

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 (E_y = 0)|_{x=0}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 (E_y = 0)|_{x=a}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 (E_x = 0)|_{y=0}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 (E_x = 0)|_{y=b}$$

(25)

Aplicando estas condiciones se obtiene la ecuación (26) donde A_{mn} es de amplitud constante y es compuesta por las constantes A y C de la ecuación (24).

$$H_z(x, y, z) = A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

(26)

De la ecuación (23) el valor de (h) queda determinado por:

$$h = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

(27)

Para las ondas transversales eléctricas, el valor de sus componentes en los ejes coordenados x y y, se muestra en la ecuación (28).

$$H_x = -\frac{j\beta}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad H_y = -\frac{j\beta}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad E_y = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

(28)

De estas ecuaciones, se obtiene que:

$$E_x(x, y) = \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

$$E_y(x, y) = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

$$H_x(x, y) = \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{m\pi}{b}\right) A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

$$H_y(x, y) = \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

(29)

donde

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

(30)

Así, cada modo transversal eléctrico (TE) es determinado solo escogiendo el valor m y n correspondiente en la ecuación (29).

2.6.2. Modo TM_{mn}

La característica principal para este tipo de modo muestra que la componente del campo magnético en la dirección de propagación (z) es cero $H_z=0$.

El modo TM_{mn} muchas veces es llamado (E_{mn}) . Aquí, las ondas de campo magnético en la dirección de propagación (z) son iguales a cero, $H_z = 0$, donde E_z es ahora la respuesta para este tipo de modos, entonces:

$$E_z(x, y, z) = E_z(x, y)e^{-j\beta z} \quad (31)$$

Así se tiene la ecuación de onda de Helmholtz reducida a dos dimensiones y se muestra como:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) E_z(x, y) = 0 \quad (32)$$

Solucionando la ecuación diferencial **(32)** por el método de separación de variables, $E_z(x, y) = X(x)Y(y)$, obteniendo, como se mostró para el caso del modo TE, la solución general para $E_z(x, y)$, que puede ser escrita como

$$E_z(x, y) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y) \quad (33)$$

Ahora para poder hallar las constantes de la ecuación **(33)** se deben aplicar las condiciones de frontera del material.

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = 0 \quad (H_y = 0)|_{x=0}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = 0 \quad (H_y = 0)|_{x=a}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = 0 \quad (H_x = 0)|_{y=0}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = 0 \quad (H_x = 0)|_{y=b}$$

(34)

Aplicando estas condiciones se obtiene la ecuación (35) donde A_{mn} es de amplitud constante y compuesta por las constantes A y C de la ecuación (33).

$$E_z(x, y, z) = B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

(35)

Llegando así, a las ecuaciones de las ondas eléctricas y magnéticas en las direcciones x y y para el modo TM.

$$E_x(x, y) = \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

$$E_y(x, y) = -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

$$H_x(x, y) = \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{m\pi}{b}\right) A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

$$H_y(x, y) = \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{n\pi}{a}\right) A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}$$

(36)

Observando las ecuaciones que representa el modo transversal magnético TM, es fácil darse cuenta que m o n no pueden tomar el valor de cero (0). Ya que si lo

hicieran las expresiones de los campos eléctricos y magnéticos en la ecuación **(33)** serian cero (0), de esta manera el menor valor de m y n para el modo TM en una guía de onda rectangular es TM_{11} . **[POZ98]**.

2.7. PROPIEDADES DE UNA GUÍA DE ONDA RECTANGULAR CON UNA ONDA DOMINANTE

2.7.1. Voltaje y corriente

El valor máximo de tensión medido en una guía de onda rectangular, corresponde al valor del campo eléctrico² E_y , evaluado en $x = a/2$.

$$V = E_y = bE e^{-j\beta z} \quad [V]$$

(37) La corriente longitudinal total en la cara superior o inferior de la guía, es igual a la suma infinitesimal de campo magnético H_x a lo largo de la dimensión mas larga de la guía ($x=0$ a $x= a$).

$$I = - \int_0^a H_x dx = \frac{2aE}{\pi K_z} e^{-j\beta z} \quad [A]$$

(38)

² Guía de onda sobre las coordenadas (x,y,z) donde la propagación se define en la dirección positiva de (z).

donde,

$$K_z = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}\right)^2}} \quad (39)$$

siendo η , la impedancia intrínseca igual a E_y/H_x

λ_0 , longitud de onda en el espacio libre, μ_r y ϵ_r son la permeabilidad relativa y la constante dieléctrica relativa, del medio interno.

2.7.2. Potencia

La potencia radiada puede ser encontrada integrando el vector de Poynting a través de la sección transversal de la guía,

$$W = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a E_y H_x dy dx = \frac{ab}{4K_z} E^2 \quad [W] \quad (40)$$

2.7.3. Impedancia característica

La impedancia característica en una guía de onda puede ser definida como en las líneas de transmisión ordinarias, donde se muestra relacionada en tres formas diferentes (i) corrientes y tensiones, (ii) potencia transmitida y tensión, (iii) potencia transmitida y corriente; obteniéndose resultados numéricos que no difieren apreciablemente de las halladas en las líneas de transmisión,

$$Z_{VI} = \frac{\pi b}{2a} Z_z \quad Z_{WV} = \frac{2b}{a} Z_z \quad Z_{WI} = \frac{\pi^2 b}{8a} Z_z \quad [\Omega] \quad (41)$$

Como ejemplo, para una guía que tiene como dieléctrico en su interior aire, la impedancia característica se muestra como:

$$Z = \frac{754b}{a \left(\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \right)^2} \right)} \quad [\Omega] \quad (42)$$

2.7.4. Atenuación

Una de las características más importantes en el estudio de guías de onda es saber como se disipa la energía a medida que la radiación electromagnética es propagada a lo largo de la guía.

Teniendo en cuenta que las guías de onda se construyen con materiales conductores reales y que el dieléctrico en su interior también es real, la disipación es generada por las pérdidas debidas a las paredes del conductor y las perdidas debidas al material dieléctrico. También es de esperar que se encuentren atenuaciones cuando existan discontinuidades u obstáculos en el material en el que este hecho la guía.

Para determinar la energía que es absorbida por las paredes, se integra las componentes del vector de Poynting que afecta las paredes paralelas como también las paredes de arriba y debajo de la guía. La magnitud del vector de Poynting dirigido en las dos paredes paralelas para la componente del campo eléctrico en dirección (y) E_y , es $|P| = \Re_c(1 + j)H_zH_z^*$

Así, disipación de potencia por unidad de longitud en las paredes paralelas para E_y es:

$$W_1 = \Re \int_0^b H_z H_z^* dy = \frac{\Re \pi^2 b E^2}{\eta^2 \beta^2 a^2} \quad (43)$$

donde H_z^* es el conjugado del vector H_z , y \Re es la resistencia intrínseca, que puede obtenerse de la ecuación (44).

$$\Re = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2} + 1}{2 \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2\right)}} \quad (44)$$

Ahora para las paredes de arriba y de debajo de la guía se integra el vector de Poynting en la dirección de estas caras. Para estas superficies el valor del campo eléctrico esta dirigido dos direcciones E_z y E_x ,

$$E_z = \Re(1 + j)H_x \text{ y } E_x = \Re(1 + j)H_z \quad (45)$$

donde, disipación de potencia por unidad de longitud en las paredes de arriba y de abajo se muestra como:

$$W_2 = \Re \int_0^a (H_x H_x^* + H_z H_z^*) dx = \frac{\Re a E^2}{2\eta^2} \quad (46)$$

La disipación de potencia total es la suma de la disipación de potencia en todas sus paredes.

$$W = W_1 + W_2 = \frac{\Re E^2}{\eta^2} \left(\frac{\pi^2 b}{\beta^2 a^2} + \frac{a}{2} \right) \quad (47)$$

La constante de atenuación en una guía de onda hueca es dada por la ecuación (48).

$$\alpha = \frac{\Re}{\eta \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \right)^2}} \left(\frac{1}{b} + \frac{2 \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \right)^2}{a} \right) \quad [\text{Nepers por metro}] \quad (48)$$

Las pérdidas debidas a un dieléctrico establecido dentro de la guía se muestra como

$$\alpha_D = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\tan \delta}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \right)^2}} \quad [\text{Nepers por metro}] \quad (49)$$

[SOU50].

2.8. GUÍAS DE ONDA CIRCULARES

Este tipo de guías son tubos circulares, Figura 2-5, que al igual que en el caso de una guía rectangular, puede propagar un gran número de modos, tanto TE como TM. Debido a su geometría, lo más apropiado para el estudio de este tipo de guías es emplear coordenadas cilíndricas, aunque se podría utilizar igualmente coordenadas rectangulares.

Para hallar la frecuencia de corte así como la longitud de onda en una guía circular se utilizan las funciones de Bessel.

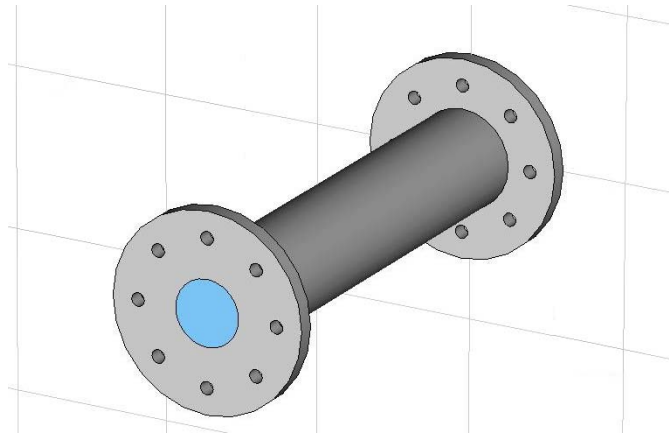


FIGURA 2-4: Guía de onda circular.

Fuente: autor.

Los conceptos de campos eléctricos y magnéticos así como de parámetros vistos para una guía de onda rectangular, también se cumplen para las guías de onda circulares, dado que la propagación de las ondas no depende de la forma de la sección transversal. Por esto los campos transversales pueden ser derivados de los componentes de los campos en la dirección de propagación, para modos TM y TE. Las componentes cilíndricas de las ondas transversales están dados como muestra la ecuación (50) donde se ha asumido que la propagación se produce en la dirección positiva de (z) ,

$$\begin{aligned}
E_\rho &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{\omega \mu}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) e^{-j\beta z} \\
E_\phi &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) e^{-j\beta z} \\
H_\rho &= \frac{j}{k_c^2} \left(\frac{\omega \varepsilon}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) e^{-j\beta z} \\
H_\phi &= \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial \rho} - \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) e^{-j\beta z}
\end{aligned}
\tag{50}$$

2.8.1. Modo TE

Al igual que en una guía rectangular, aquí las ondas de campo eléctrico en la dirección de propagación (z) son iguales a cero, $E_z = 0$, donde H_z es ahora la respuesta para este tipo de modos, entonces:

$$\nabla^2 H_z + k^2 H_z = 0 \tag{51}$$

Ahora si, $H_z(\rho, \phi, z) = E_z(\rho, \phi) e^{-j\beta z}$ la ecuación **(51)** puede expresarse por medio de coordenadas cilíndricas, así:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k_c^2 \right) H_z(\rho, \phi) = 0 \tag{52}$$

que puede resolverse por separación de variables para obtener:

$$\frac{\rho^2}{R} \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{\rho}{R} \frac{dR}{d\rho} + \rho^2 k_c^2 = -\frac{1}{P} \frac{d^2 P}{d\phi^2}$$

(53)

Simplificando la solución igualando la ecuación (53) a una constante.

$$\frac{-1}{P} \frac{d^2 P}{d\phi^2} = k_\phi^2$$

(54)

Obteniendo,

$$\rho^2 \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \rho \frac{dR}{d\rho} + (\rho^2 k_c^2 - k_\phi^2) R = 0$$

(55)

De (54) y (55) resultan dos ecuaciones generales que darán la solución para (H_z) ,

$$P(\phi) = A \sin k_\phi \phi + B \cos k_\phi \phi$$

(56)

donde k_ϕ debe ser un entero ya que la solución de (h_z) debe ser una función periódica. La ecuación (56) se muestra entonces:

$$P(\phi) = A \sin n\phi + B \cos n\phi$$

(57)

y

$$R(\rho) = C J_n(k_c \rho) + D Y_n(k_c \rho)$$

(58)

si J_n y Y_n son funciones de Bessel, con $D=0$, ya que $Y_n(k_c\rho)$ es infinito para $\rho=0$, la solución de (H_z) es:

$$H_z(\rho, \phi) = (A \sin n\phi + B \cos n\phi)J_n(k_c\rho) \quad (59)$$

En la ecuación (50) se encontró E_ϕ de H_z .

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A \sin n\phi + B \cos n\phi)J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \quad (60)$$

donde $J'_n(k_c\rho)$ denota la derivada de J_n .

Para determinar en número de onda de corte k_c es necesario hacer cumplir las condiciones de frontera sobre las paredes de la guía,

$E_\phi(\rho, \phi) = 0$ cuando $\rho = a$ (el radio interno de la guía).

Así,

$$k_{c_{nm}} = \frac{\rho'_{nm}}{a} \quad (61)$$

ρ'_{nm} representa la n-esimas raíces de las funciones de Bessel J'_n

De la misma forma que en el caso rectangular la constante de propagación para el modo TE_{mn} se presenta como:

$$\beta_{nm} = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\rho'_{nm}}{a}\right)^2} \quad (62)$$

Las raíces ρ'_{nm} están determinadas en **Tabla (2)** para distintos modos de operación.

$\rho'_{0,1}$	3,832	$\rho'_{0,2}$	7,016
$\rho'_{1,1}$	1,841	$\rho'_{1,2}$	5,332
$\rho'_{2,1}$	3,054	$\rho'_{2,2}$	6,706
$\rho'_{3,1}$	4,201	$\rho'_{3,2}$	8,013

Tabla 2: Raíces de las funciones de Bessel para varios modos de operación TE_{nm} en una guía de onda circular.

[RAI78]

La frecuencia de corte esta dada por:

$$f_{c_{mn}} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{\rho'_{nm}}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (63)$$

En la guía de ondas circular existe un modo de propagación principal donde se atenúan los demás modos de orden superior, o modo con la frecuencia mas baja, y se presenta como TE₁₁, donde el primer subíndice simboliza el total de variaciones de la intensidad de campo en una longitud de onda a lo largo de la

trayectoria circular; el segundo subíndice representa el total de variaciones de la intensidad de campo en la dirección radial.

Con todo lo dado anteriormente se presentan las ecuaciones de las ondas eléctricas y magnéticas en las direcciones ρ y ϕ para el modo TE.

$$\begin{aligned}
 E_{\rho} &= \frac{-j\omega\mu n}{k_c^2 \rho} (A \cos n\phi + B \sin n\phi) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \\
 E_{\phi} &= \frac{j\omega\mu}{k_c} (A \sin n\phi + B \cos n\phi) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \\
 H_{\rho} &= \frac{-j\beta}{k_c \rho} (A \sin n\phi + B \cos n\phi) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \\
 H_{\phi} &= \frac{-j\beta n}{k_c^2 \rho} (A \cos n\phi + B \sin n\phi) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}
 \end{aligned}$$

(64)

2.8.2. Potencia

La potencia radiada puede ser encontrada integrando el vector de Poynting a través de la sección transversal de la guía,

$$W = \frac{1}{2} \mathcal{R}e \left\{ \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} E \times H^* \cdot z \rho \, d\phi d\rho \right\} = \frac{\pi\omega\mu |A|^2 \mathcal{R}e(\beta)}{4K_c^4} (\rho'_{11}{}^2 - 1) J_1^2(k_c a) \quad [W]$$

(65)

donde H^* es el conjugado del vector H, y A representa la amplitud de la onda electromagnética.

2.8.3. Atenuación

Para determinar la energía que es absorbida por las paredes, se integran las componentes del vector de Poynting que afecta la pared a través de la guía.

$$P_c = \frac{R_s}{2} \int_{\phi=0}^{2\pi} |J_s|^2 a d\phi = \frac{\pi |A|^2 R_s a}{2} \left(1 + \frac{\beta^2}{k_c^4 a^2} \right) J_1^2(k_c a)$$

(66)

Las pérdidas o atenuación debida al dieléctrico presente en el interior de la guía presentan las mismas características halladas para la guía rectangular ecuación (49).

2.8.4. Modo TM

Realizando un procedimiento similar para encontrar las componentes de las ondas en el modo transversal eléctrico se muestran las ecuaciones que modelan las ondas eléctricas y magnéticas en el modo TM [POZ98],

$$E_\rho = \frac{-j\beta}{k_c} (A \sin n\phi + B \cos n\phi) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}$$

$$E_\phi = \frac{-j\beta n}{k_c^2 \rho} (A \cos n\phi - B \sin n\phi) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}$$

$$H_\rho = \frac{j\omega \epsilon n}{k_c^2 \rho} (A \cos n\phi - B \sin n\phi) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}$$

$$H_\phi = \frac{-j\omega \epsilon}{k_c} (A \sin n\phi + B \cos n\phi) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}$$

(67)

La frecuencia de corte, f_c , para el modo transversal magnético, TM_{nm} , presenta la misma expresión que para el modo TE_{nm} , la diferencia esta en que las raíces, ρ'_{nm} , cambian. En la tabla 3 se presentan algunos valores de este parámetro,

$v'_{0,1}$	2,405	$v'_{0,2}$	5,520
$v'_{1,1}$	3,832	$v'_{1,2}$	7,016
$v'_{2,1}$	5,136	$v'_{2,2}$	8,654

Tabla 3: Raíces de las funciones de Bessel para varios modos de operación TM_{nm} en una guía de onda circular.

[RAI78].

Es fácil darse cuenta que de acuerdo con los valores dados para la longitud de onda de corte, f_c , existen valores diferentes de frecuencia de corte, λ_c , dado que existe un relación entre λ_c y f_c , la cual se muestra matemáticamente como, $f_c = c/\lambda_c$, donde c , es la velocidad de la luz.

2.9. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS Y DEL FACTOR DE CALIDAD

Como resultado del cálculo de las perdidas, el factor de calidad puede ser obtenido así:

2.9.1. Pérdidas dieléctricas

La pérdida de potencia dieléctrica es calculada con base en las propiedades del material como pérdidas del ángulo del delta de tangente (o la correspondiente conductividad) y teniendo en cuenta la distribución de campo eléctrico en el volumen del material, de esta manera se tiene:

$$P_D = \pi f \tan \delta \varepsilon_0 \varepsilon_r \int |E|^2 dV$$

(68)

La fórmula anterior proporciona el valor medio de la pérdida de potencia del dieléctrico. Como datos de entrada, se dispone de los valores máximos de los campos eléctricos y magnéticos.

2.9.2. Pérdidas superficiales

Matemáticamente es expresado como:

$$P_W = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}} \int |H|^2 ds$$

(69)

La expresión anterior proporciona el valor medio de la energía absorbida por las pérdidas superficiales. Como datos de entrada, se dispone de los valores máximos de los campos eléctricos y magnéticos.

2.9.3. Pérdidas de potencia

Como se mencionó, las pérdidas totales de potencia son la suma de las pérdidas superficiales y las debidas al dieléctrico. Así se tiene:

$$P = P_W + P_D$$

(70)

2.9.4. Factor Q

El factor Q (factor de calidad), es definido como 2π veces la relación de la energía W a la pérdida total de potencia P sobre un período T,

$$Q = \frac{2\pi W}{T P} = 2\pi f \frac{W}{P}$$

(71)

El total de energía es aquella almacenada en la estructura simulada, y es igual a la energía eléctrica o magnética:

$$W = W_E = W_M$$

$$W_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \int |E|^2 dv$$

$$W_M = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \int |H|^2 dv$$

(72)

2.10. CARBURO DE SILICIO (SiC)

Este compuesto de carbono y silicio es uno de los materiales vanguardistas, perteneciente a la familia de los cerámicos no óxidos; tomado generalmente como dieléctrico, y otras veces como semiconductor a tal punto de utilizarlo en dispositivos electrónicos de alta potencia como tiristores. Hasta el momento está revolucionando el campo investigativo, ya que puede ser empleado en diferentes aplicaciones, mostrando excelentes propiedades, dentro de las que se destaca su incremento rápido y eficiente de la temperatura por medio de la absorción de radiación electromagnética [GRA85].

Como ya se mencionó el SiC puede absorber la radiación de microondas, sin embargo, hay más de 400 tipos conocidos de carburo de silicio, siendo los mas estudiados los politipos alfa, 4H y 6H. Algunos tipos no absorben microondas en absoluto, otros son mínimos absorbentes. La mayoría de los tipos varían en cuanto a su absorción, siendo capaz de absorber sólo a temperaturas elevadas, es decir, por encima de los 300°C. La temperatura máxima alcanzada por irradiación con energía electromagnética típicamente oscila en un valor de 500°C [WIL94]. A menudo la concentración de carburo de silicio debe mantenerse bajo,

para evitar degradación de las propiedades y características de la matriz que lo contiene. Las temperaturas más altas se pueden lograr en combinación con algunos materiales tales como bloques sólidos que componen la mezcla de carburo de silicio con otro material. Temperaturas de 600-800°C se alcanzan en 3-4 minutos de la exposición a la energía de microondas a 600 W con bloques sólidos de carburo de silicio. Este tipo de material tiene una densidad inferior a la del cristal único de carburo de silicio.

Propiedades del (SiC)

En la tabla 4 se resumen algunas de las propiedades más importantes del del carburo de silicio

Formula	SiC
Constante dieléctrica (ϵ_R)	10,8
Factor de disipación (tangente de perdidas, ($\tan \delta$))	0,003
Volumen de resistividad	$10^5 \Omega\text{-cm}$
Emisividad	0,89
Densidad de masa	$3,2 \text{ g/cm}^3$
Calor específico	$0,69 \text{ J/g}^\circ\text{C}$
Conductividad térmica (k)	$350 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Coefficiente de temperatura de expansión (TCE)	$4,8 \text{ ppm}^\circ\text{C}$
Punto de fusión	$2700 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabla 4: Propiedades del carburo de silicio.

[3W5], [TPRC67].

3. SIMULACIÓN DE GUÍAS DE ONDA

La radiación de microondas producidas por el magnetrón se guía al material que se esté tratando; la guía, por lo tanto, debe ser seleccionada de acuerdo a las características del material como de la materia en tratamiento como pérdida o atenuación, forma y el tamaño de la materia en tratamiento.

En la práctica las microondas son usadas en un rango de frecuencias relativamente grande, pero en este proyecto se tratará las microondas a una frecuencia de 2,45 GHz, la cual es la más apropiada para el calentamiento de materiales [TEH93]. Basándose en esta información y del hecho que el flujo de radiación electromagnética a través de la guía debe ser el más eficiente. El parámetro principal a tener en cuenta para el diseño será la atenuación de las ondas electromagnéticas debidas a las paredes de la guía y al dieléctrico en el interior.

Habiendo seleccionado el generador de microondas mas adecuado, se tendrá que seleccionar el tipo de guía de onda y el material con el cual será construido.

3.1. DISEÑO DE GUÍAS RECTANGULARES

Para una guía de onda rectangular es fundamental tener en cuenta los siguientes tres puntos de diseño:

- La relación entre la pared más larga (a) y la pared más corta (b) están aproximadamente en una proporción de 2:1; esto asegurará, para un rango de frecuencia determinada la propagación de las ondas en el modo principal de operación.

- La dimensión de la pared con menor longitud (b), fija la tensión de ruptura de la guía de onda y, por lo tanto, la capacidad de manejo de máxima potencia. Así, que cuando la dimensión de (b) disminuye la eficiencia de transferencia de la radiación electromagnética, también disminuye.
- Los parámetros físicos de la guía de onda rectangular determinan las características de funcionamiento de las ondas de campo eléctrico y magnético. La dimensión de las guías, determina el rango de frecuencias de funcionamiento y por tanto la cantidad de modos que se transferirán a lo largo de la guía.

La atenuación es función del material de la guía de ondas, sus dimensiones, la longitud de onda y el modo de propagación. Ahora, si una aplicación específica pretende reducir al mínimo esta atenuación, es posible que la guía sea construida o revestida en su interior con un material en el que las pérdidas se puedan reducir al mínimo, como el oro (Au) o la plata (Ag).

Como se ha venido estableciendo no se puede propagar cualquier frecuencia sin tener en cuenta los tres puntos de diseño mencionados anteriormente. Por ejemplo si la relación de las dimensiones de la guía es 1:1 a una frecuencia de 2,45 GHz y con aire presente en el interior, no existirá ningún modo de propagación en dimensiones menores a 61 mm; y a partir de ese valor se comenzará a propagar dos modos, que son TE_{10} y TE_{01} . En guías con dimensiones menores a 61 mm no se propaga ningún modo, Figura 3-1.

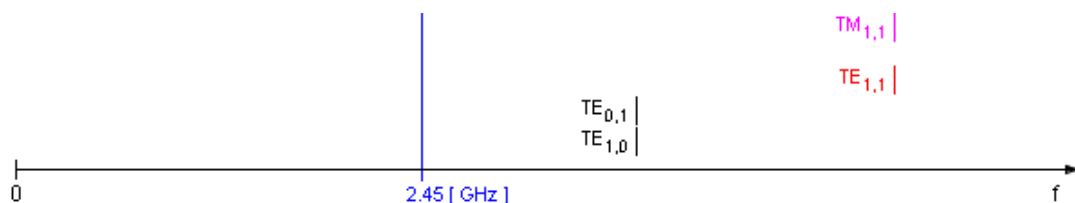


FIGURA 3-1: Modos electromagnéticos para dimensión de (a) <61.

Guías con dimensiones mayores a 61 mm permiten la propagación, Figura 3-2.

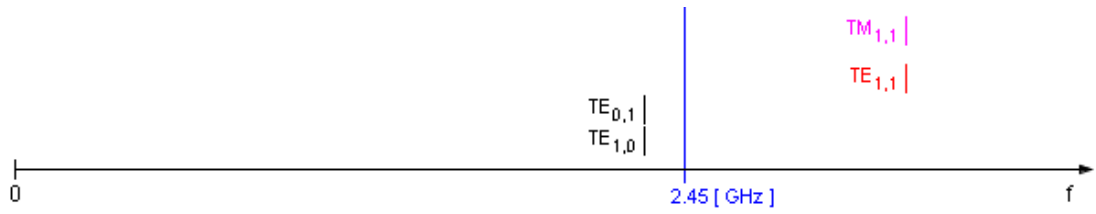


FIGURA 3-2: Modos electromagnéticos para dimensión de (a) >61.

Fuente: autor.

Las Figuras 3-3 y 3-4 mostrarán el campo eléctrico de los modos propagados; en la Figura 3-2 y la Figura 3-5 se muestran de los modos que no se propagan con las dimensiones especificadas, > 61 mm.

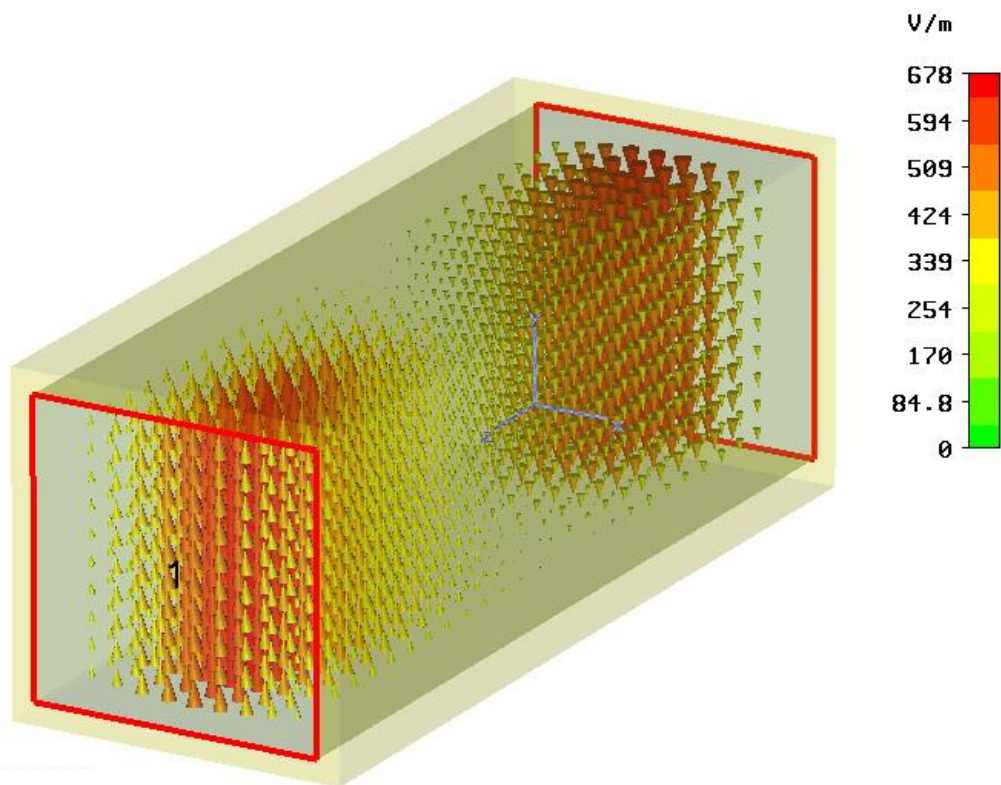


FIGURA 3-3: Transmisión del campo eléctrico del modo TE_{10} .

Fuente: autor.

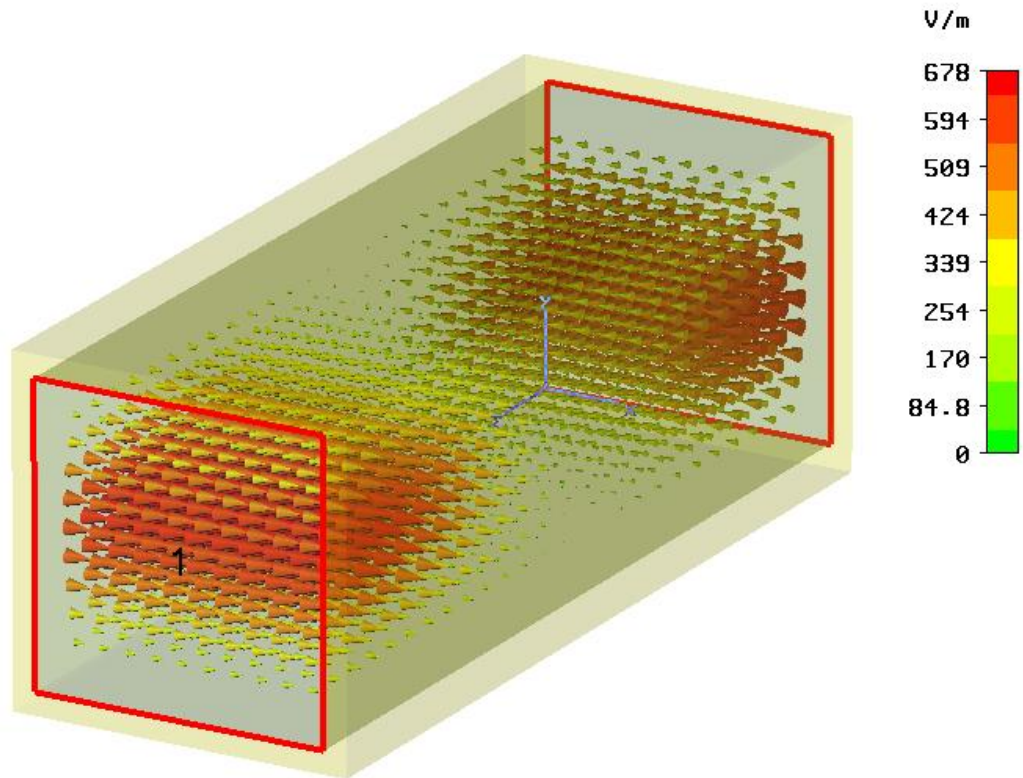


FIGURA 3-4: Transmisión del campo eléctrico del modo TE_{01} .

Fuente: autor.

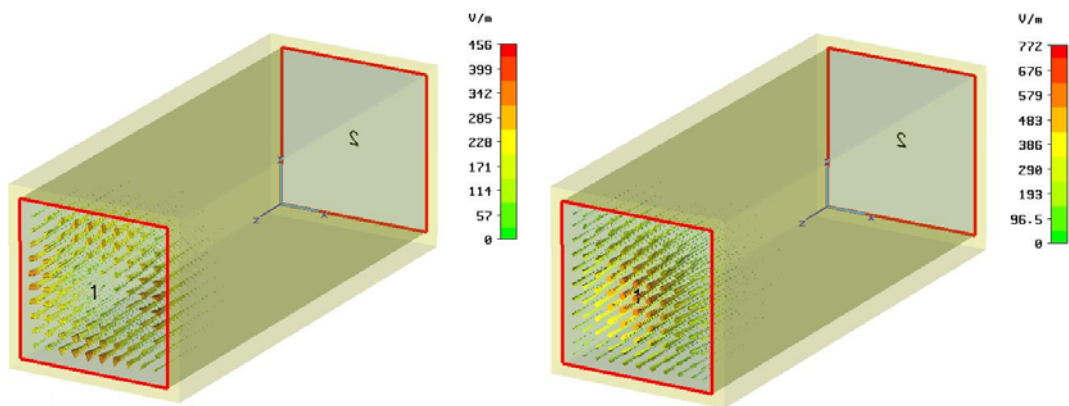


FIGURA 3-5: Campo eléctrico de los dos modos siguientes a TE_{10} y TE_{01} .

Fuente: autor.

A partir de las figuras 3-3, 3-4 y 3-5, como es afectada la radiación electromagnética por los parámetros escogidos. Aquí los parámetros existentes en la guía a partir de 61 mm

$$k_c = 0,48332193 \text{ (rad/cm)}$$

$$\beta = 0,17233412 \text{ (rad/cm)}$$

$$\lambda_c = 13,000001 \text{ (cm)}$$

$$\lambda_g = 36,459324 \text{ (cm)}$$

$$v_f = 8,9325347E10 \text{ (cm/s)}$$

Ahora si la frecuencia se aumenta tres veces la cantidad de modos propagados serán:

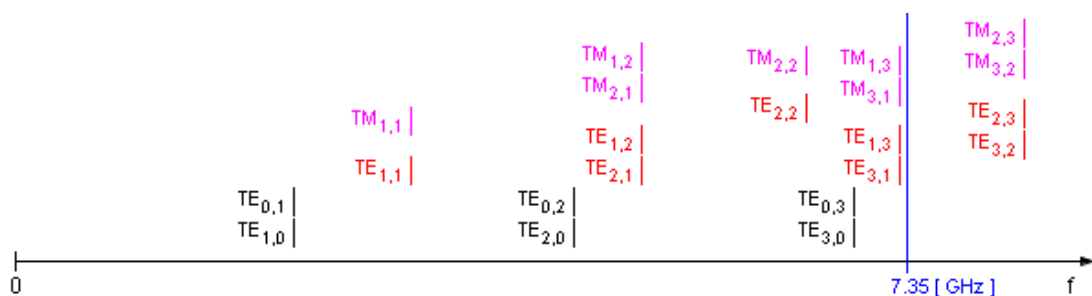


FIGURA 3-6: Frecuencia de operación aumentada tres veces.

Fuente: autor.

En la Figura 3-6 se observa como con las dimensiones > 65 mm y una frecuencia de operación mayor, la cantidad de modos transmitida es mayor. Ahora si la relación de las dimensiones de la guía es 3:1 a una frecuencia de 2,45 GHz y con aire presente en el interior, no existirá ningún modo de propagación para dimensiones de (a) menores de 61 mm; y a partir de ese valor se comenzará a propagar el modo TE_{10} , Figura 3-7:

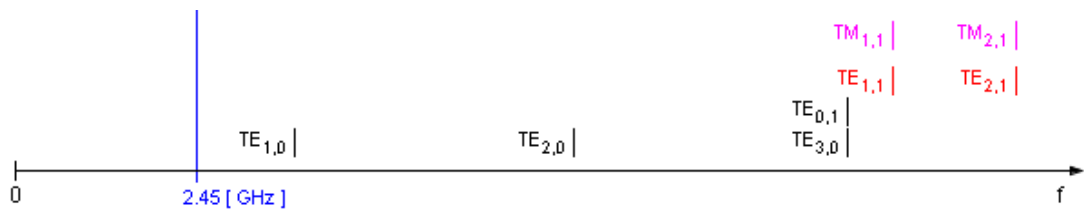


FIGURA 3-7: Número de modos a 2,45 GHz para dimensiones de (a) menores de 61 mm.

Fuente: autor.

Cuando el valor de (a) es mayor de 61 mm, se puede propagar el modo TE_{10}

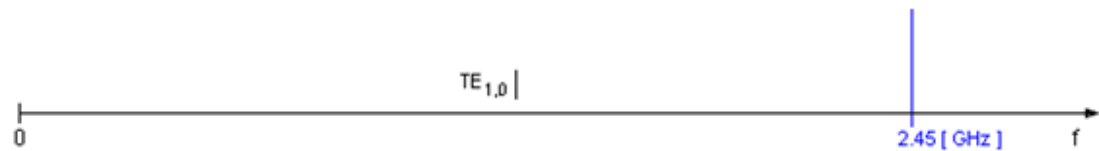


FIGURA 3-8: Guía con dimensión de (a) mayor de 61 mm.

Fuente: autor.

El campo eléctrico de los modos propagados Figura 3-7 con dimensiones de (a), > 61 mm se muestra en la Figura 3-9.

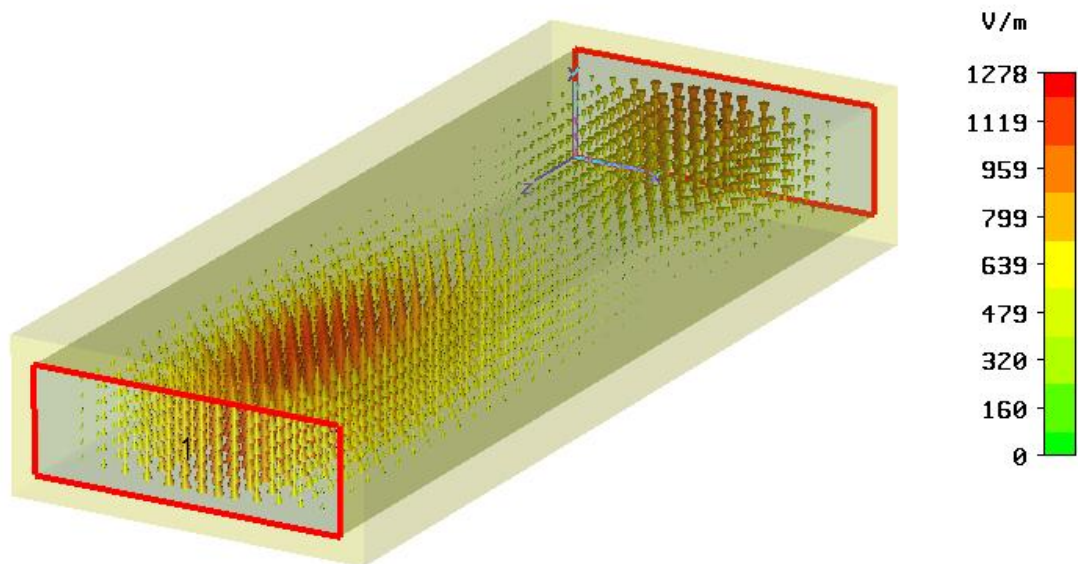


FIGURA 3-9: Modo de propagación principal TE_{10} cuando la relación de dimensiones es 3:1.

Fuente: autor.



FIGURA 3-10: Muestra de dos modos no propagados, cuando la relación de dimensiones es 3:1.

Fuente: autor.

Así la atenuación se va convirtiendo en el parámetro que defina la mejor elección de una guía de onda. Para ver esto, a continuación se mostrará el cálculo de las pérdidas y del factor de calidad, para cada una de las relaciones de (a) y (b).

RELACIÓN 1:1

Materiales	Conductividad	permeabilidad (μ)	Pérdidas/W(pico)	Q
Conductor Enclaustrado	5.8000e+007	1.0000e+000	3.6908e-004	1.1867e+005
Plata (Material de la guía)	6.1700e+007	1.0000e+000	2.1141e-003	2.0718e+004
Suma total de pérdidas			2.4831e-003	1.7639e+00

RELACIÓN 2:1

Materiales	Conductividad	permeabilidad(μ)	Pérdidas/W(pico)	Q

Conductor Enclaustrado	5.8000e+007	1.0000e+000	3.1676e-004	1.3297e+005
Plata (Material de la guía)	6.1700e+007	1.0000e+000	2.8880e-003	1.4585e+004

Suma total de pérdidas			3.2048e-003	1.3143e+004

RELACIÓN 3:1

Materiales	Conductividad	permeabilidad(μ)	Pérdidas/W(pico)	Q

Conductor Enclaustrado	5.8000e+007	1.0000e+000	3.7279e-004	1.1698e+005
Plata (Material de la guía)	6.1700e+007	1.0000e+000	3.7848e-003	1.1522e+004

Suma total de pérdidas			4.1575e-003	1.0489e+004

RELACIÓN 5:1

Materiales	Conductividad	permeabilidad (μ)	Pérdidas/W(pico)	Q

Conductor Enclaustrado	5.8000e+007	1.0000e+000	2.8672e-004	1.3489e+005
Plata (Material de la guía)	6.1700e+007	1.0000e+000	4.9053e-003	7.8840e+003

Suma total de pérdidas			5.1921e-003	7.4486e+003

Los valores mostrados de pérdidas y factor de calidad para cada una de las relaciones entre paredes de la guía (1:1, 2:1, 3:1, 5:1), muestran que la proporción 2:1 de las dimensiones presenta un mejor acoplamiento³ entre pérdidas y factor-Q (el factor de calidad es dado para cada uno de los valores de pérdidas dados como Conductor Enclaustrado, Plata (Material de la guía), Suma total de pérdidas, ya que este término es dependiente del valor de las pérdidas).

Los cálculos de las pérdidas pueden ser realizados mediante análisis teórico usando las ecuaciones (68) a (72); de esta manera las curvas típicas pueden ser observadas en la Figura 3-11, a partir de las cuales se puede ver que las pérdidas son mayores para los modos de orden superior. También son más altos para los modos en guías circulares, en comparación a los modos en guías rectangulares.

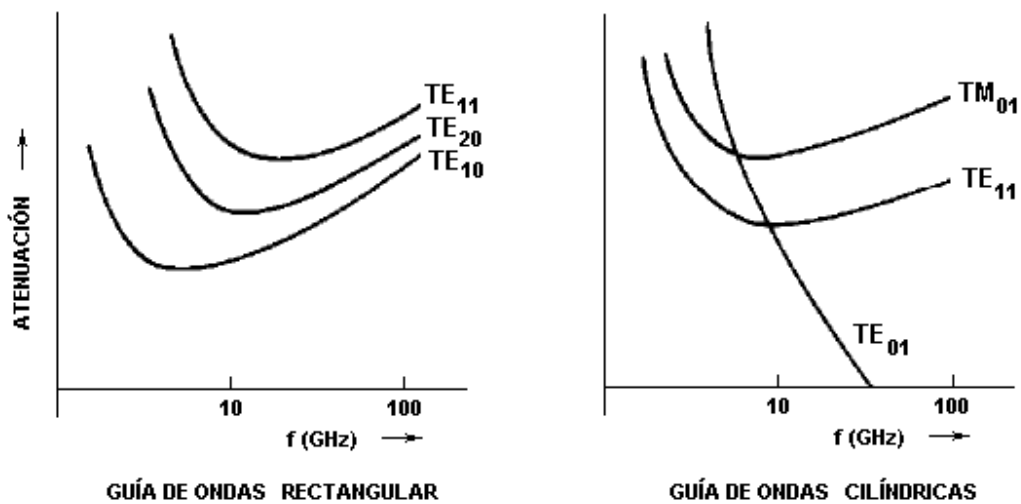


FIGURA 3-11: Pérdidas típicas en guías de onda rectangulares y cilíndricas [NER99]

Fuente: autor.

³ Menor suma de pérdidas y mayor factor de calidad.

Observando las graficas de la figura 3-11, se puede dar cuenta que la atenuación en guías circulares es mayor a bajas frecuencias, frecuencias sobre las cuales se trabaja en este proyecto, mas específicamente frecuencias alrededor de 2,45 GHz, que son las frecuencias típica para calentamiento dieléctrico. Realizando la simulación de guías circulares se logro corroborar este planteamiento dando resultados en donde la energía incidente era completamente atenuada, mostrando una gráfica donde era poco práctico realizar un análisis.

3.2. BANDA DE OPERACIÓN DE UNA GUÍA DE ONDA RECTANGULAR

Los límites de frecuencia de operación en una guía de onda son aproximadamente entre 125% y el 189% de la frecuencia de corte. En la **Tabla 5** se presentarán los valores estándar en una guía de ondas rectangular donde se especifica la banda de frecuencia de operación, frecuencia de corte, dimensiones y atenuación teórica observadas en dos materiales diferentes (Latón y aluminio).

Rango Frecuencia Modo TE10 [GHz]	Frecuencia de corte [GHz]	Dimensiones internas de la guía de ondas		Atenuación teórica dB/m Latón Aluminio
		Anchura mm (in)	Altura mm (in)	
0,32 – 0,49	0,256	584,20(23,00)	292,10 (11,50)	- 0,0014 – 0,0009
0,35 – 0,53	0,281	533,40 (21,00)	266,70 (10,50)	- 0,0016 – 0,0010
0,41 – 0,625	0,328	457,20 (18,00)	228,60 (9,00)	- 0,0019 – 0,0013
0,49 – 0,75	0,393	381,00 (15,00)	191,00 (7,50)	- 0,0026 – 0,0017
0,64 – 0,96	0,513	292,10 (11,50)	146,05 (5,75)	- 0,0038- 0,0026
0,75 – 1,12	0,605	247,65 (9,75)	123,83 (4,875)	- 0,005 – 0,003
0,96 – 1,45	0,766	195,58 (7,70)	97,79 (3,85)	- 0,007 – 0,005
1,12 – 1,70	0,908	165,10 (6,50)	82,55 (3,25)	0,015-0,01 0,009-0,006
1,45 – 2,20	1,16	129,54 (5,10)	64,77 (2,55)	0,021 – 0,014 0,013 – 0,009
1,70 – 2,60	1,37	109,22 (4,30)	54,61 (2,15)	0,027 – 0,018 0,017 – 0,011

2,20 – 3,30	1,74	86,36 (3,40)	43,18 (1,70)	0,037 – 0,026 0,023 – 0,016
2,60 – 3,95	2,08	72,14 (2,84)	34,04 (1,34)	0,052 – 0,035 0,032 – 0,022
3,30 – 4,90	2,58	58,17 (2,29)	29,08 (1,145)	0,066 – 0,047 0,041 – 0,029
3,95 – 5,85	3,15	47,55 (1,872)	22,15 (0,872)	0,097 – 0,067 0,060 – 0,042
4,90 – 7,05	3,71	40,39 (1,59)	20,19 (0,759)	0,108 – 0,080 0,067 – 0,050
5,85 – 8,20	4,30	34,84 (1,372)	15,80 (0,622)	0,137 – 0,108 0,085 – 0,067
7,05 – 10,0	5,26	28,50 (1,122)	12,62 (0,497)	0,192 – 0,149 0,120 – 0,093
8,20 – 12,4	6,56	22,86 (0,90)	10,16 (0,40)	0,300 – 0,208 0,187 – 0,129
10,0 – 15,0	7,87	19,05 (0,75)	9,53 (0,375)	0,355 – 0,248 0,221 – 0,154
12,4 – 18,0	9,49	15,80 (0,622)	7,90 (0,311)	0,447 – 0,329 0,279 – 0,205
15,0 – 22,0	11,57	12,95 (0,510)	6,48 (0,255)	0,611 – 0,443 0,381 – 0,276
26,5 – 40,0	21,08	7,11 (0,280)	3,56 (0,140)	1,589 – 1,088 0,99 – 0,677
33,0 – 50,0	26,34	5,69 (0,224)	2,84 (0,112)	2,240 – 1,523 -
40,0 – 60,0	31,36	4,78 (0,188)	2,388 (0,094)	2,807 – 1,972 -
50,0 – 75,0	39,87	3,759 (0,148)	1,879 (0,074)	4,159 – 2,842 -
60,0 – 90,0	48,35	3,099 (0,122)	1,549 (0,061)	5,683 – 3,811 -
75,0 – 110,0	59,01	2,540 (0,100)	1,270 (0,050)	7,292 – 5,131 -
90,0 – 140,0	73,84	2,032 (0,080)	1,016 (0,040)	11,109 – 7,127 -
110 – 170	90,84	1,651 (0,065)	0,8255 (0,0325)	15,426 – 9,775 -
140 – 220	115,75	1,2954 (0,051)	0,6477(0,0255)	22,27 - 13,994 -

Tabla 5: Valores estándar en una guía de ondas rectangular.

Fuente: Electronic Industry Association.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA GUÍA DE ONDAS RECTANGULAR

Como ejemplo se tomará una guía de ondas rectangular llena de aire operando en la banda de 8,12 a 12,4 GHz, con dimensiones $a= 22,86$ mm y $b= 10,16$ mm, para encontrar la frecuencia de corte de los cuatro primeros modos de propagación.

Teóricamente se tienen los siguientes resultados

Modo	m	n	f_c [GHz]
TE	1	0	6,562
TE	2	0	13,123
TE	0	1	14,764
TE , TM	1	1	16,156

Tabla 6: Resultados teóricos del ejemplo propuesto

Ahora se pueden comparar los resultados obtenidos por medio de la simulación donde además, se mostrará la forma en como se distribuyen estos modos, y como operan dentro de la guía. La forma de la guía puede observarse en la Figura 3-12.

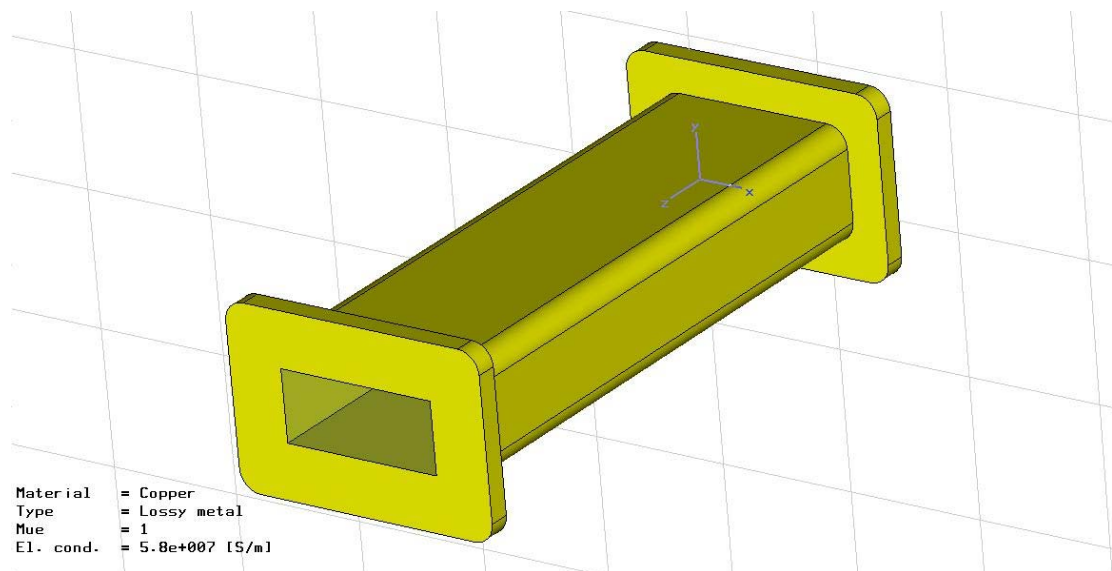


FIGURA 3-12: Guía de onda rectangular, $a= 22,86$ mm y $b= 10,16$ mm.

Fuente: autor.

Los valores de cada una de las frecuencias de corte, el tipo de modo y la impedancia de onda de los diferentes modos se resumen en la **tabla 7**.

Modo	Tipo	Impedancia de onda	Frecuencia de corte
1	TE	488,09	6,54884
2	TE	488,94	13,0028
3	TE	36,464	14,7718
4	TE	311,67	16,1584

Tabla 7: Resumen de resultados de la simulación.

A continuación se mostrará la forma en que están propagados los modos dentro de la guía presentes, ver Figuras 3-14 a 3-18 en el puerto donde la radiación electromagnética es introducida.

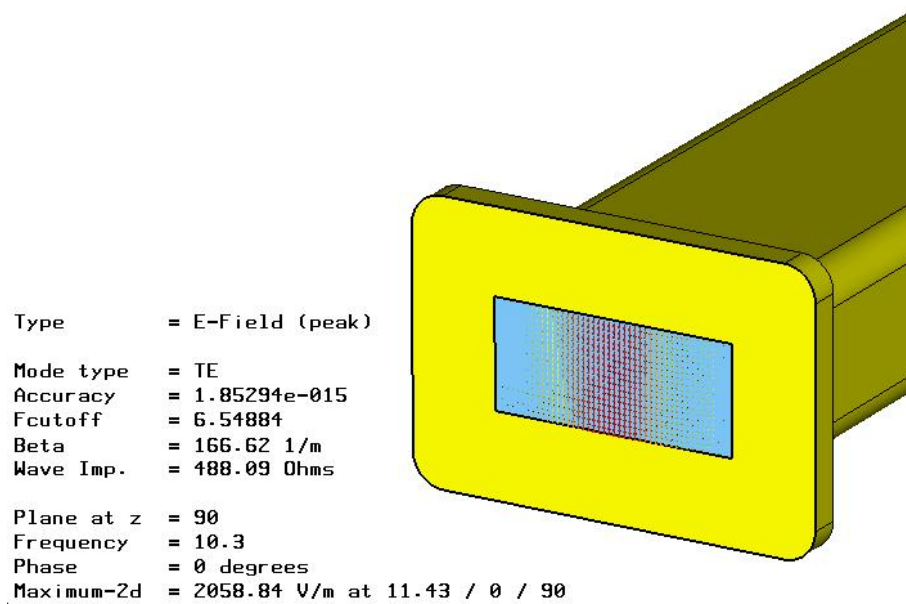


FIGURA 3-13: Representación del primer modo.

Fuente: Autor.

Type = E-Field (peak)
 Mode type = TE
 Accuracy = 1.89765e-015
 Fcutoff = 13.0028
 Alpha = 166.33 1/m
 Dist. -40dB = 27.6869 mm
 Wave Imp. = 488.94 Ohms

Plane at z = 90
 Frequency = 10.3
 Phase = 0 degrees
 Maximum-2d = 1993.25 V/m at 6.76463 / 1.27435 / 90

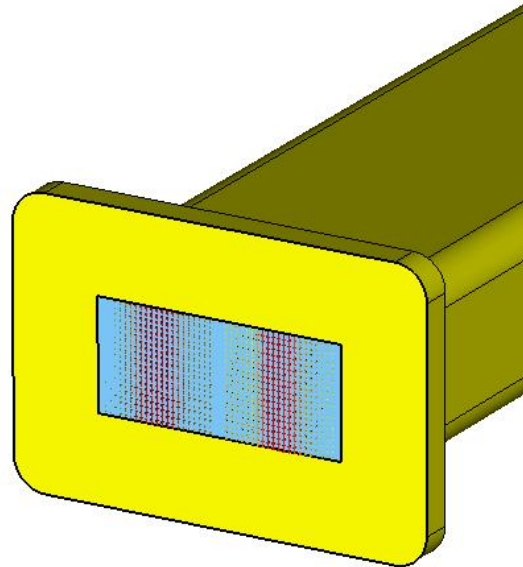


FIGURA 3-14: Representación del segundo modo.

Fuente: Autor.

Type = E-Field (peak)
 Mode type = TE
 Accuracy = 2.26836e-015
 Fcutoff = 14.7718
 Alpha = 221.92 1/m
 Dist. -40dB = 20.7515 mm
 Wave Imp. = 366.464 Ohms

Plane at z = 90
 Frequency = 10.3
 Phase = 0 degrees
 Maximum-2d = 1831.68 V/m at 4.43194 / 5.08 / 90

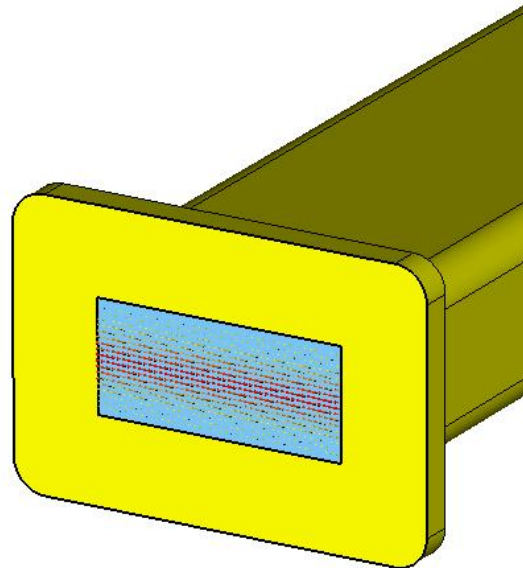


FIGURA 3-15: Representación del tercer modo.

Fuente: Autor.

Type = E-Field (peak)
 Mode type = TE
 Accuracy = 2.82977e-015
 Fcutoff = 16.1584
 Alpha = 260.935 1/m
 Dist. -40dB = 17.6488 mm
 Wave Imp. = 311.67 Ohms

Plane at z = 90
 Frequency = 10.3
 Phase = 0 degrees
 Maximum-2d = 2169.31 V/m at 1.16634 / 5.08 / 90

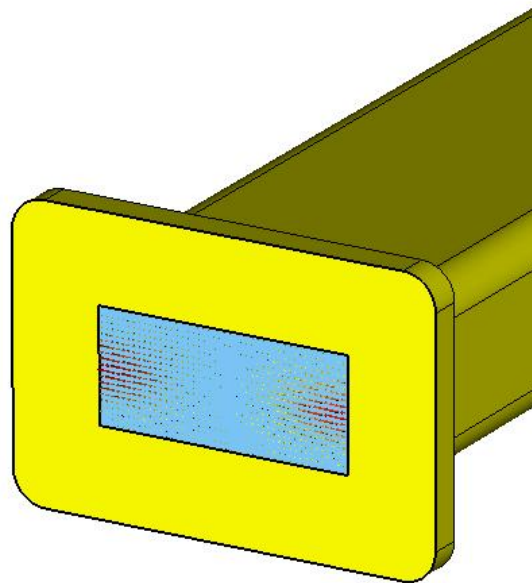


FIGURA 3-16: Representación del cuarto modo.

Fuente: Autor.

Type = E-Field (peak)
 Component = Abs

Mode type = TE
 Accuracy = 2.82977e-015
 Fcutoff = 16.1584
 Alpha = 260.935 1/m
 Dist. -40dB = 17.6488 mm
 Wave Imp. = 311.67 Ohms

Plane at z = 90
 Frequency = 10.3
 Phase = 0 degrees
 Maximum-2d = 2169.31 V/m at 1.16634 / 5.08 / 90

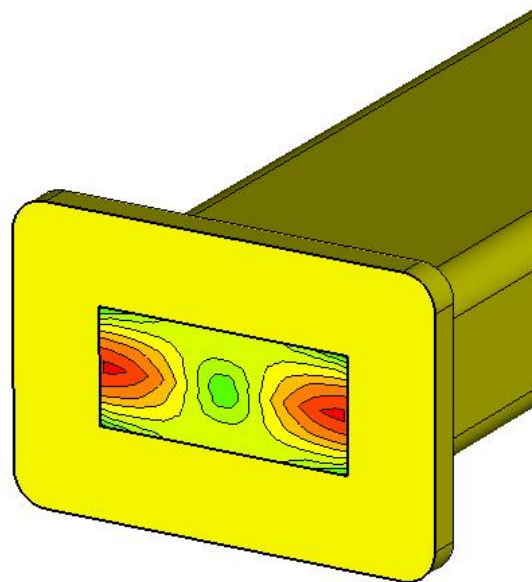


FIGURA 3-17: Forma alternativa de representación del cuarto modo.

Fuente: Autor.

Además de estas formas de representación en el puerto, es posible mostrar como se distribuye a lo largo de la guía; para ello se muestran dos formas en que esto se puede lograr, ver Figuras 3-19 y 3-20.

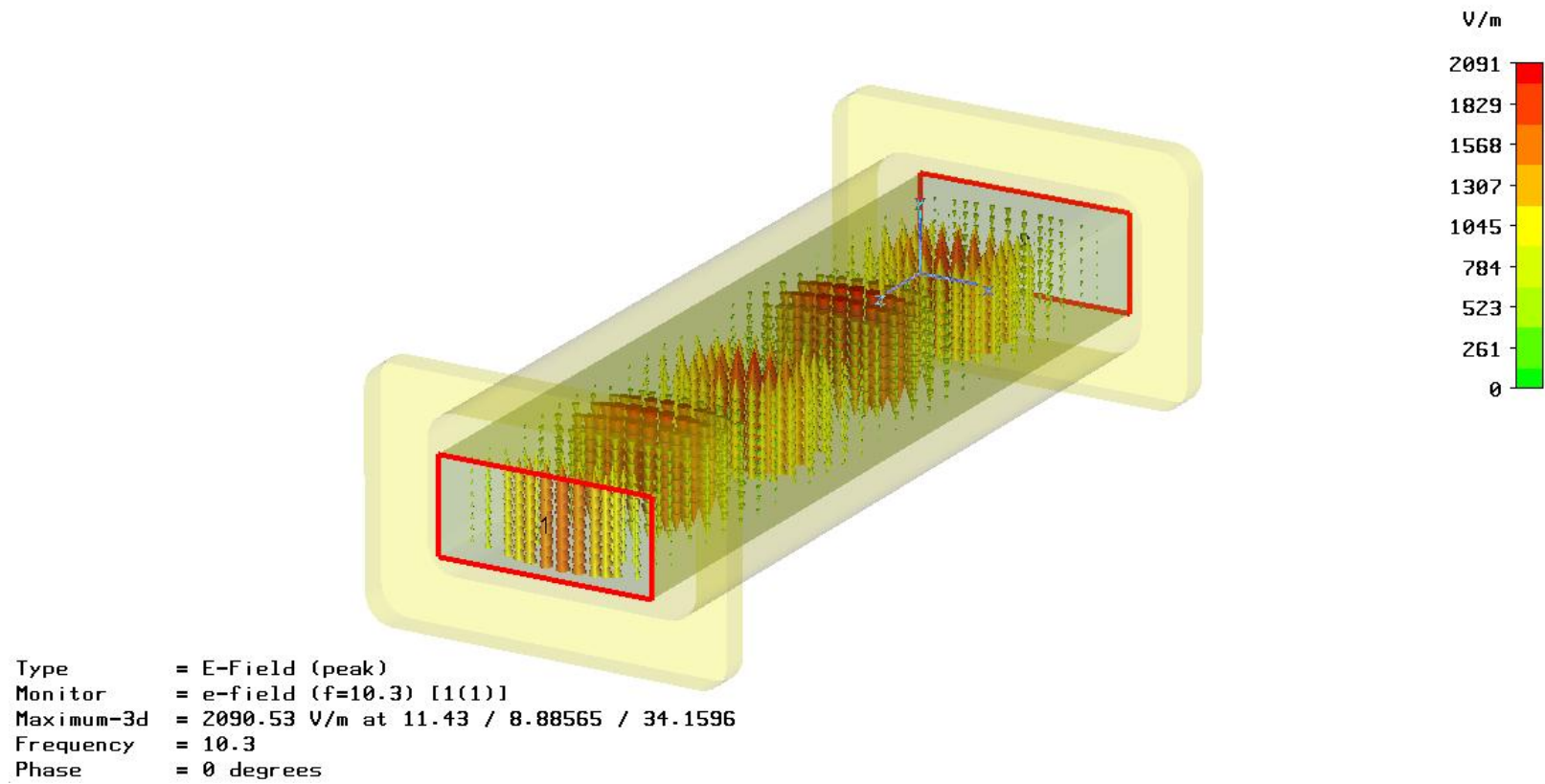


FIGURA 3-18: Propagación a lo largo de la guía donde se puede mostrar conjuntamente el cambio de fase por el cambio de dirección de las flechas.

Fuente: Autor.

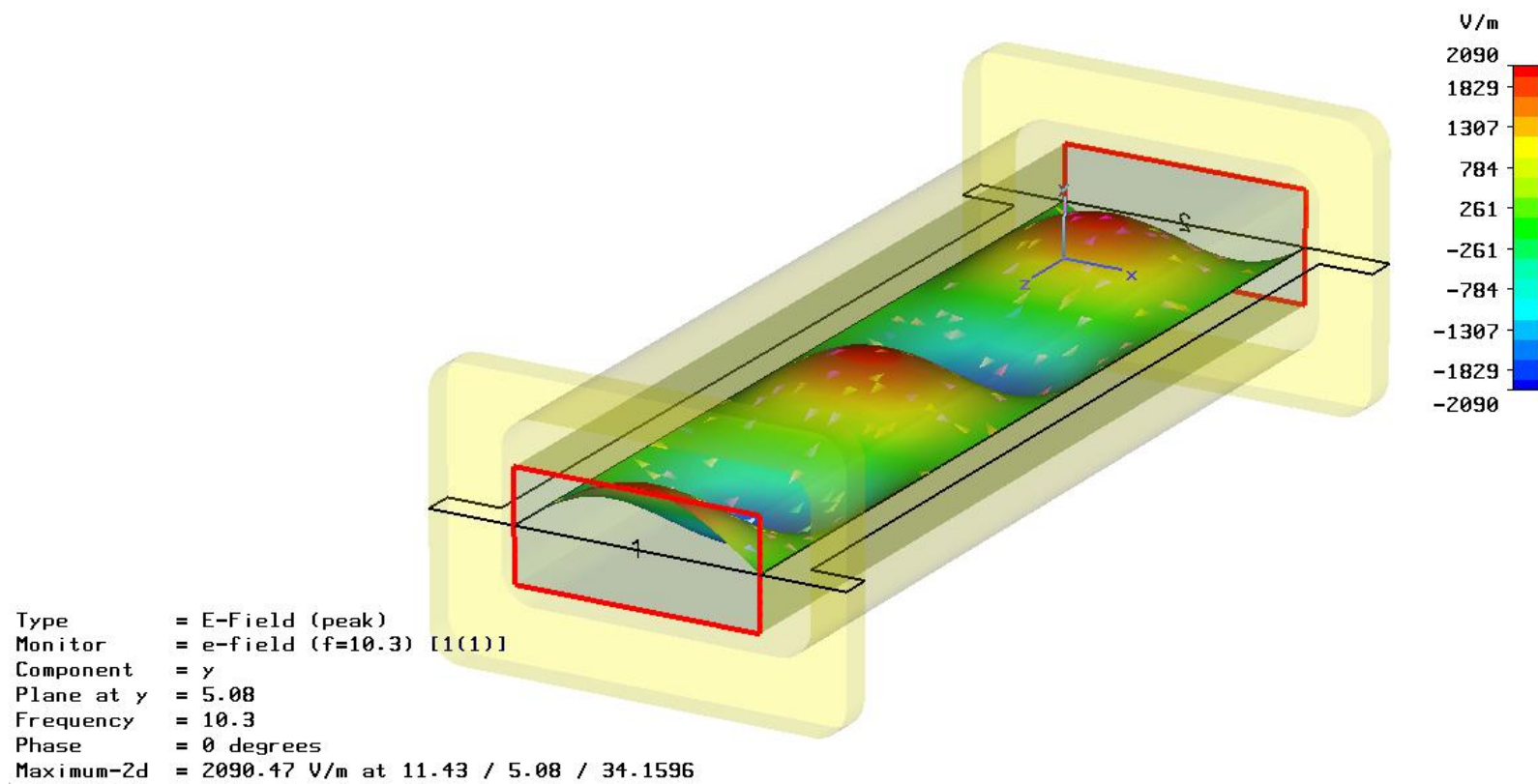


FIGURA 3-19: Segunda forma de representación. Tipo de diagrama Carpet. Donde las depresiones y elevaciones muestran la forma en que la onda TE varía a medida que se desplaza a lo largo de la guía.

Fuente: Autor.

Los valores que se exponen en la esquina inferior izquierda de las imágenes son:

- **Type:** Tipo de campo, Eléctrico (E) o magnético (H).
- **Component:** en el caso de diagrama escalar, muestra cual componente es graficada (X, Y, Z).
- **Mode type:** El tipo de modo graficado, TEM, Quasi TEM, TE, TM o desconocido.
- **Accuracy:** La exactitud del cálculo para cada modo graficado.
- **Fcutoff:** En el caso de modos TE o TM, la frecuencia de corte.
- **Beta:** El valor beta de los modos.
- **Alpha:** en caso de un modo desconocido o modo TE / TM, el valor de Alpha.
- **Dist. -40 dB:** La distancia en que el valor de campo de un modo de corta duración es reducido a -40 dB
- **Wave Imp.:** Impedancia de la onda.
- **Frequency:** La frecuencia al cual los modos y sus parámetros han sido calculados. Esta en el centro del rango de frecuencias dado en la configuración del rango de frecuencias.
- **Phase:** La fase para el cual el modo es graficado.
- **Maximum-2d:** Muestra el valor y localización del campo máximo dependiendo del tipo seleccionado (E o H).

Los valores logrados no son exactamente iguales a los obtenidos teóricamente, pero si lo suficientemente cerca como para darse cuenta de que los resultados obtenidos en la simulación son válidos; esto es debido a que las características de los materiales usados en la simulación son muy cercanos a las características de los valores reales de los materiales, en este caso, el cobre (material de la guía).

3.4. DISEÑO EN GUÍAS CIRCULARES

El concepto clave al diseñar una guía de ondas circular, es tener en cuenta que el diámetro de la guía de onda circular deben ser lo suficientemente grande como para soportar del modo principal de operación TE_{11} a la menor frecuencia de funcionamiento; y al mismo tiempo darse cuenta que el diámetro de la guía no debe ser tan grande como para dejar propagar el segundo modo de operación TM_{01} en la mayor frecuencia de funcionamiento. Todo esto porque cuando otros modos de operación están en funcionamiento o propagándose al interior de la guía esto representa pérdidas o atenuación de la radiación electromagnética.

Su modo principal es el TE_{11} , y su longitud de onda de corte es $\lambda_c = 1.71d$, donde d es el diámetro interior. El siguiente modo es TM_{01} , ($\lambda_c = 1.31d$) y el tercer modo es el TE_{21} . ($\lambda_c = 1.03d$). Para que una guía de onda circular propague solo el modo principal (TE_{11}), se debe cumplir: $1.71d > \lambda_c > 1.31d$.

Una aplicación práctica del uso de guía de ondas circulares el como línea de transmisión en comunicaciones móviles a frecuencias de operación alrededor de 16 GHz, donde para reducir las pérdidas o atenuaciones de los demás modos de operación dentro de la guía, la construyen corrugada para de esta manera esas pequeñas deformaciones logren desaparecer rápidamente a lo largo de la guía.

A continuación se muestra la longitud de onda de la guía con respecto a la variación del diámetro de la misma, al igual que el diámetro ideal a una frecuencia de operación alrededor de 2,45 GHz donde se muestra los dos primeros modos de operación.

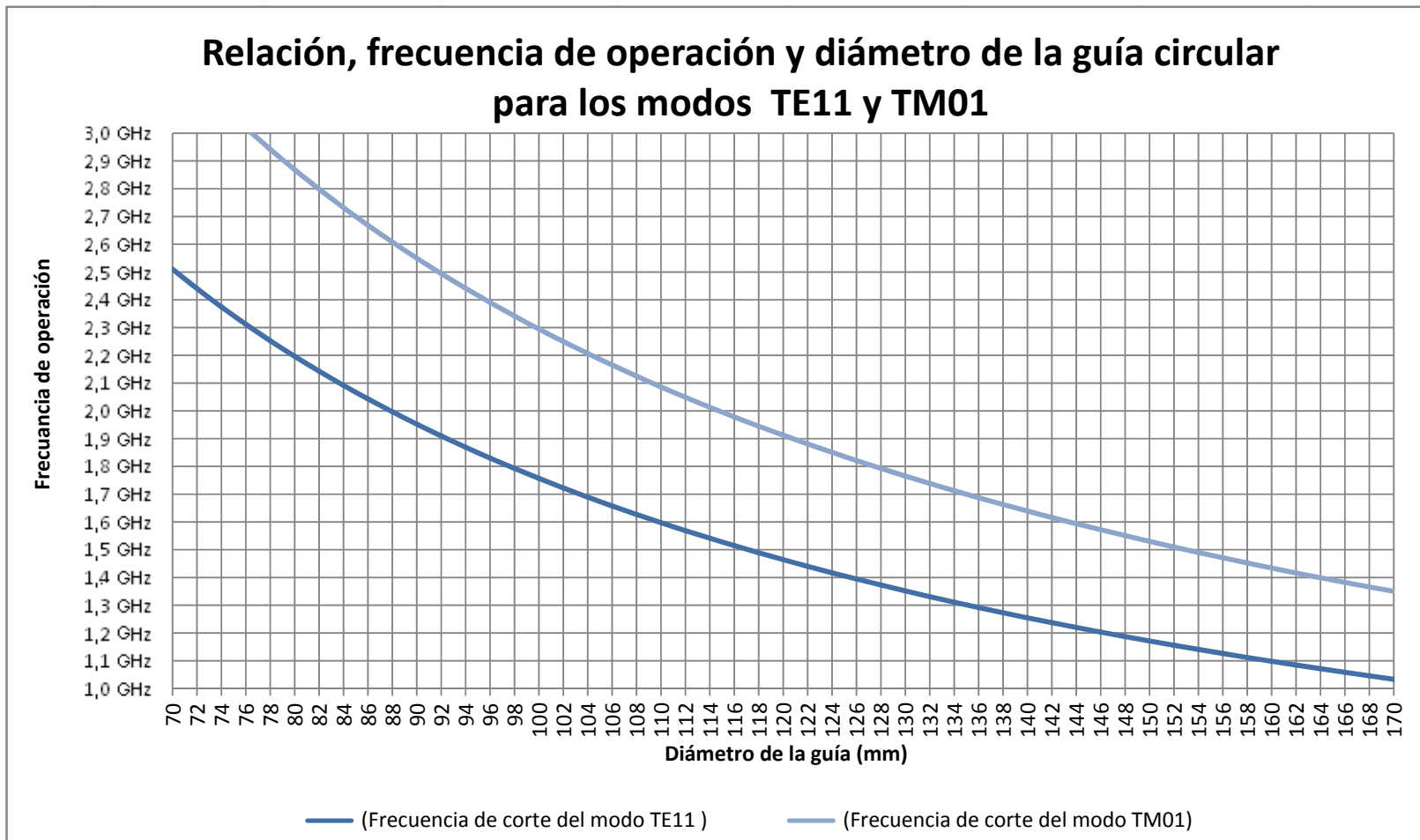


FIGURA 3-20: Frecuencia de corte para el modo TE11 y TM01 en una guía circular.

Fuente: Autor.

A continuación se mostrarán los tamaños estándar de una guía de ondas circular

Rango frecuencia, GHz	Interno Diámetro, inches (mm)
8,2 – 9,97	1,094 (27,79)
8,5 – 11,6	0,938 (23,83)
9,97 – 12,4	0,797 (20,24)
12,4 – 15,9	0,688 (17,48)
13,4 – 18,0	0,594 (15,08)
15,9 – 18,0	0,500 (12,70)
17,5 – 20,5	0,455 (11,56)
20 – 24,5	0,396 (10,06)
24 – 26,5	0,328 (8,33)
26,5 – 33	0,315 (8,00)
33 – 38,5	0,250 (6,35)
38,5 – 40	0,219 (5,56)
33 – 38,5	0,250 (6,35)
38,5 – 43	0,219 (5,56)
43 – 50	0,188 (4,78)
40 – 43	0,210 (5,33)
43 – 50	0,188 (4,78)
50 – 60	0,165 (4,19)
50 – 58	0,165 (4,19)
58 – 68	0,141 (3,58)

68 – 75	0,125 (3,18)
60 – 66	0,136 (3,45)
66 – 88	0,125 (3,18)
88 – 90	0,094 (2,39)
75 – 88	0,112 (2,84)
88 – 110	0,094 (2,39)
90 – 115	0,089 (2,26)
115 – 140	0,075 (1,91)
110 – 140	0,073 (1,85)
140 – 160	0,059 (1,50)
140 – 220	0,058 (1,47)
170 – 260	0,049 (1,25)

Tabla 8: Rangos de frecuencia y medidas estándar de una guía de ondas circular

Fuente: Electronic Industry Association.

Basado en la información de la **tabla 8**, en las Figuras 3-23 a 3-25 se muestra la forma en que los modos se presentan en una guía de ondas circular, enseñando la forma en que se distribuye el campo eléctrico y el campo magnético. Para tal caso, el rango de frecuencia escogida a manera de ejemplo es de 20 a 24,5 GHz, con el fin de poder observar fácilmente estos campos; lo que representa un radio interno de 10,06 mm, con aire como dieléctrico en su interior. Este ejemplo se muestra en las Figuras 3-22 a 3-25.

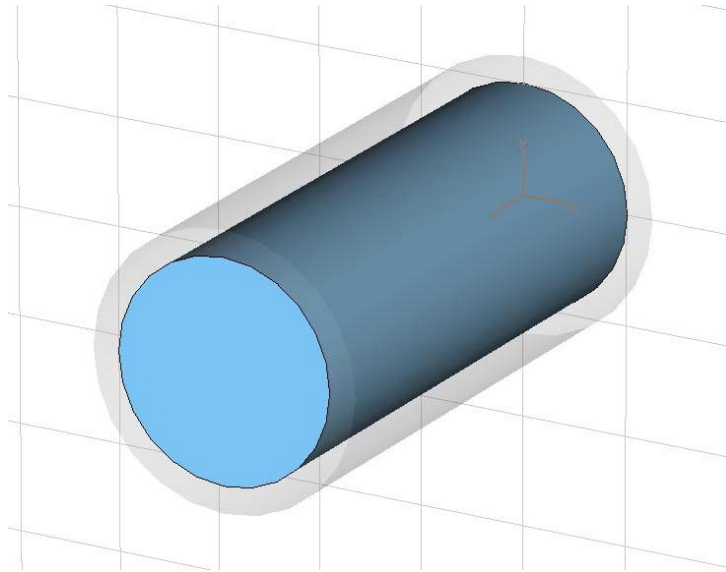


FIGURA 3-21: Guía de onda circular con material PEC y aire en su interior.

Fuente: Autor.

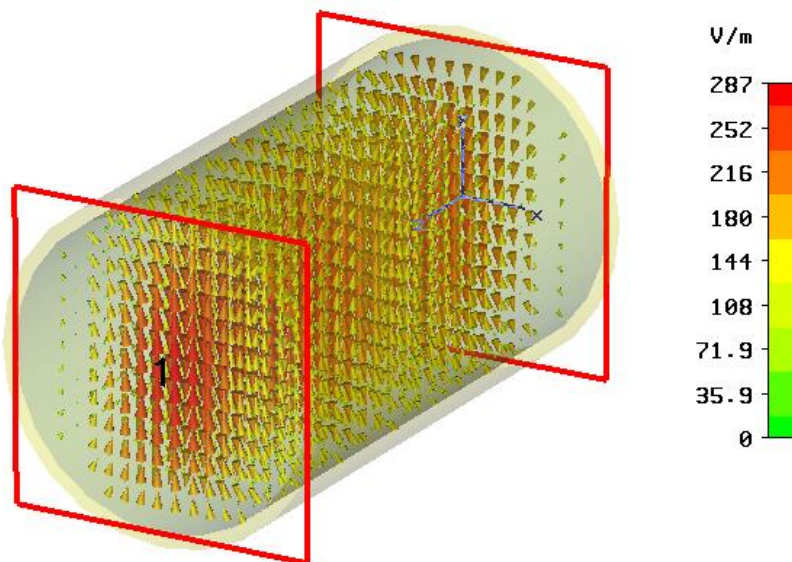


FIGURA 3-22: Propagación del campo eléctrico del modo TE₁₁ en la guía circular.

Fuente: Autor.

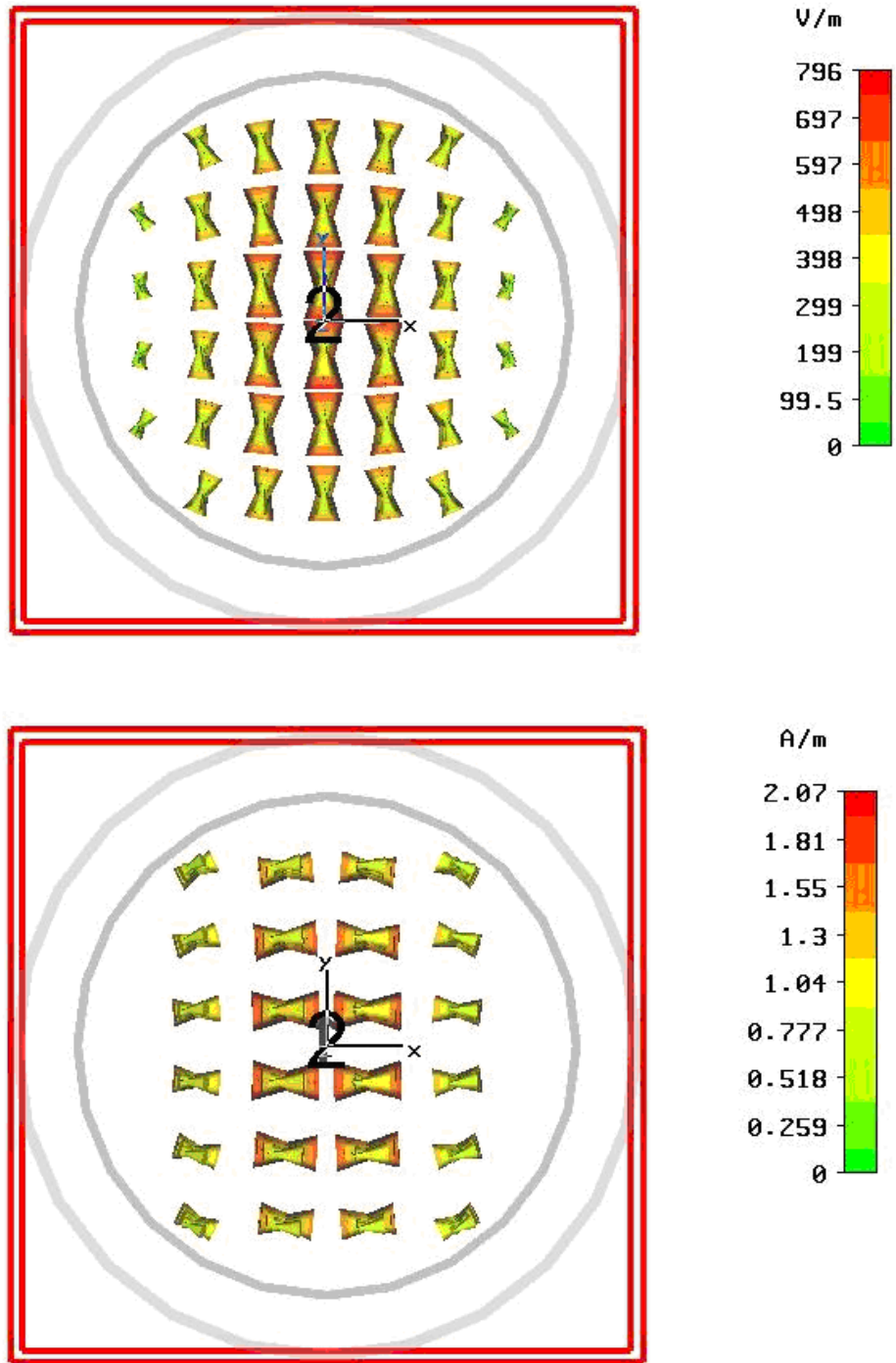


FIGURA 3-23: Modo TE₁₁, arriba líneas de campo eléctrico, abajo líneas de campo magnético.

Fuente: Autor.

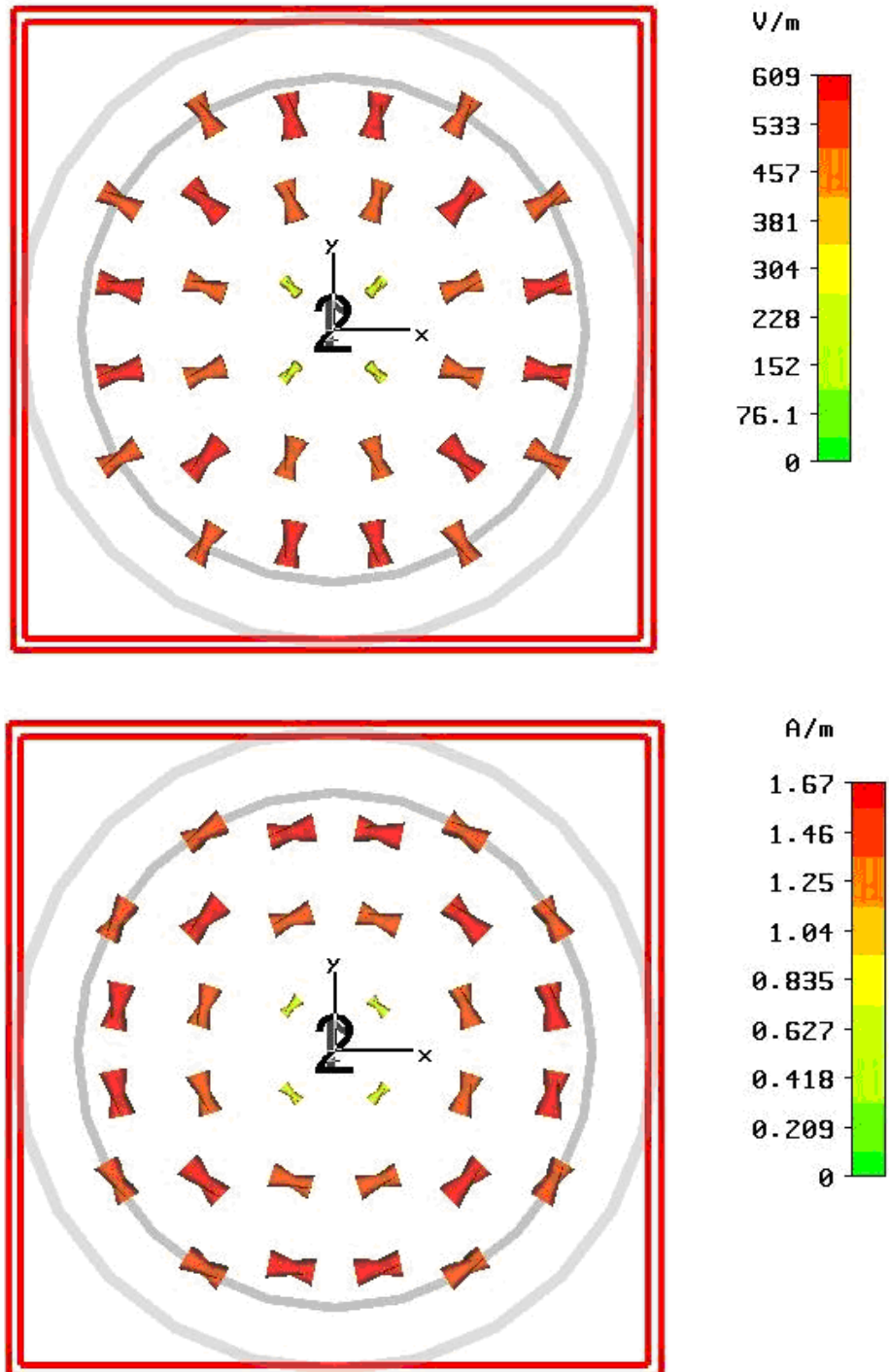


FIGURA 3-24: Modo TE01, arriba líneas de campo eléctrico, abajo líneas de campo magnético.

Fuente: Autor.

En general se simularon un total de 10 modos en el que diferencia el tipo la impedancia de onda y la frecuencia de corte, como aparece en la Tabla 9.

Modo	Tipo	Impedancia de Onda	Frecuencia de corte
1	TE	384	4,37
2	TE	384	4,37
3	TM	364	5,7
4	TE	398	7,24
5	TE	398	7,24
6	TE	413	9,08
7	TM	344	9,08
8	TM	344	9,08
9	TE	421	9,96
10	TE	421	9,96

Tabla 9: Resultado general de la simulación para un total de 10 modos

4. MODELADO DEL CARBURO DE SILICIO DENTRO DE UNA GUÍA DE ONDA RECTANGULAR

Calentar con microondas involucra la conversión de la radiación electromagnética a calor, ya sea para elevar la temperatura del material a un nivel crítico para el secado de materiales o para la fundición de materiales. El calentamiento de materiales dieléctricos, como el (SiC), con microondas requiere conocimientos sobre los principios fundamentales del calentamiento por microondas.

Como es bien sabido el modelado matemático iterativo que desarrollan software especializados el tiempo de consumo en la parte experimental, y si el modelo puede simular satisfactoriamente el comportamiento del calor en el dieléctrico en un sistema de microondas, los efectos de composición, la geometría, y los cambios en la estructura pueden ser probados sin el costo de la preparación de muestras y pruebas.

Ya se ha visto como es el comportamiento de las ondas eléctricas y magnéticas, flujo de potencia, corriente superficial, al igual el tipo de modos que se puede transmitir sin problema en una guía de ondas rectangular estándar WR284 con dimensiones en las que se puede operar sin problema a una frecuencia de 2,45 GHz. El montaje general puede ser observado como muestra la Figura 4-1 para operar en el modo de TE_{10} . Consiste en una guía de onda rectangular, en la que una distribución de campo eléctrico de n medias longitudes de onda es establecido; conectado a una brida⁴ con un acoplamiento del iris en un lado y con un émbolo en cortocircuito al otro lado.

⁴ accesorio para conectar las guías de ondas, mejor conocido como "flange"

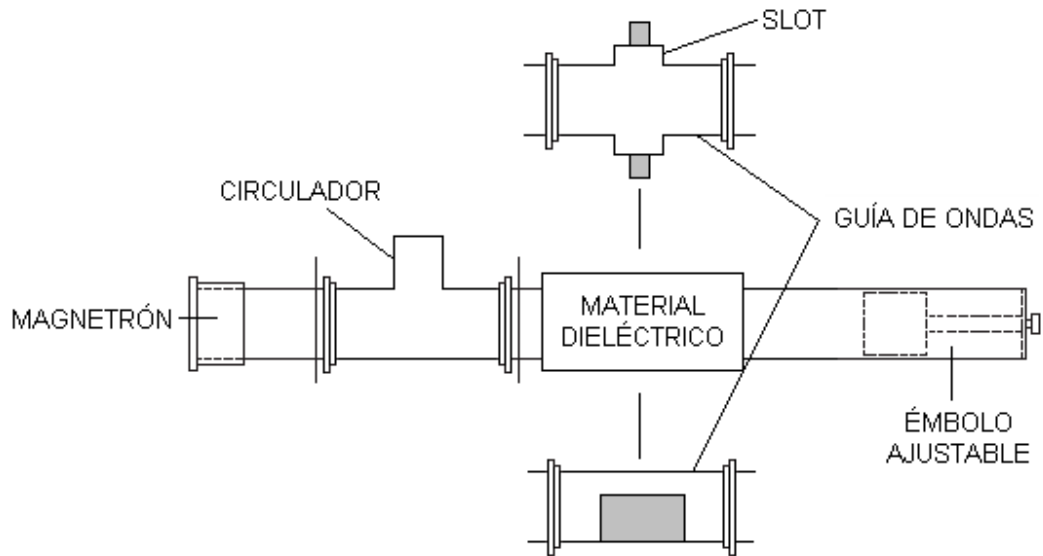


FIGURA 4-1: Montaje general.

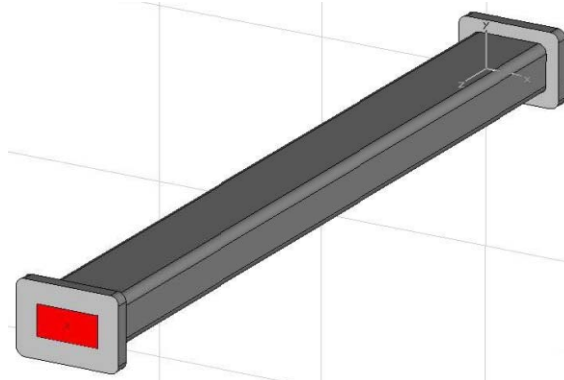
Fuente: Autor del proyecto.

El material dieléctrico a ser procesado se inserta en el aplicador a través de una ranura o simplemente colocado en la guía de onda. Para conseguir un rendimiento óptimo de tal aplicador, tanto la posición del émbolo, que determina la frecuencia de operación, y el tamaño del iris, el que se establece la cantidad de la energía trasladada al aplicador, son dependientes de las propiedades dieléctricas del material en estudio.

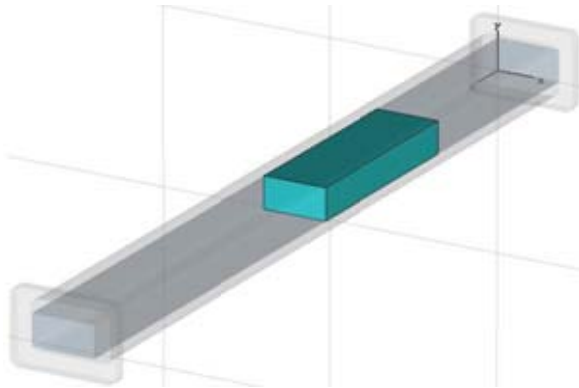
Ahora se introducirá un dieléctrico (SiC) en el interior de la guía para analizar su comportamiento ante radiación electromagnética. El material de la guía es de aluminio, aunque puede ser cobre, materiales comúnmente usados en el desarrollo de guías de onda debido a su economía y a sus excelentes propiedades eléctricas; en su interior contendrá al material dieléctrico, como se ve en la Figura 4-2, donde se muestra una guía de onda estándar WR284, y la distribución del material dieléctrico y el aire en su interior; con el fin de mostrar la propagación del campo eléctrico dentro de la guía y la pérdida de densidad de potencia, Figuras

4-3 y 4-4. Esto permite que el material dieléctrico se ubique en la posición de máximo campo eléctrico para una óptima transferencia de la energía electromagnética.

a)



b)



c)

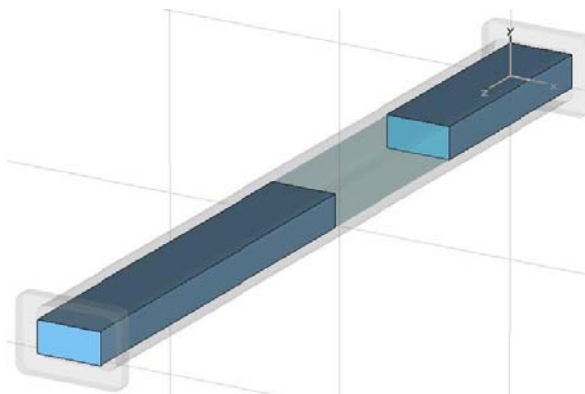


FIGURA 4-2: Guía de onda WR284 a) Vista total, b) SiC, c) Aire.

Fuente: Autor.

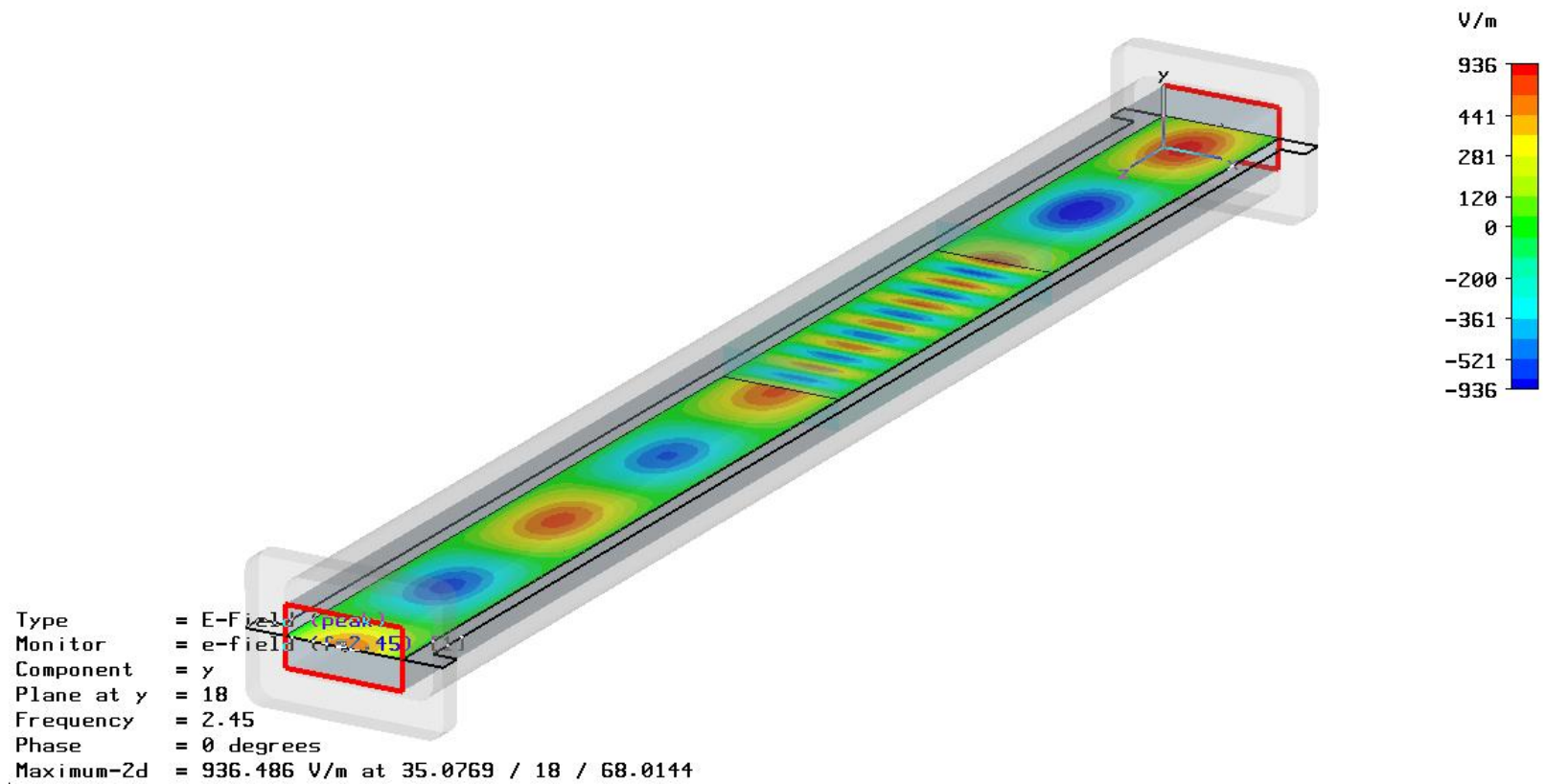


FIGURA 4-3: Distribución del campo eléctrico al interior de la guía.

Fuente: Autor.

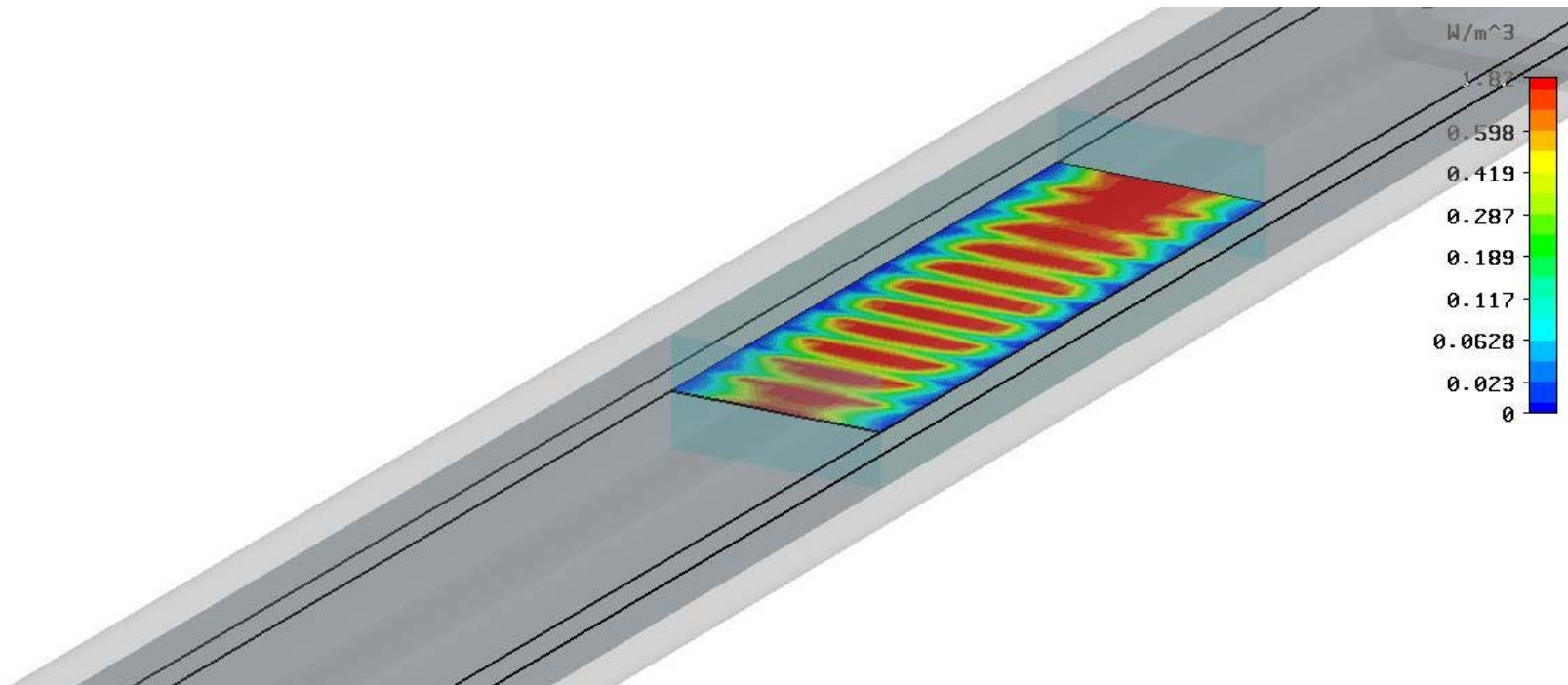


FIGURA 4-4: Pérdida de densidad de potencia.

Fuente: Autor.

Resultado numérico de las pérdidas en cada uno de los materiales involucrados en el análisis de la guía de ondas rectangular mostrada.

Materiales	Conductividad	Permeabilidad(μ)	Pérdidas/W(pico)	Q
Conductor Enclaustrado	5.8000e+007	1.0000e+000	1.1298e-004	1.1392e+006
Aluminio (Material de la guía)	3.7200e+007	1.0000e+000	7.9700e-003	1.6148e+004
Suma de pérdidas superficiales			8.0830e-003	1.5923e+004
Volumen de pérdidas			5.3196e-004	2.4194e+005
Suma total de perdidas			8.6150e-003	1.4939e+004

Es posible que otras configuraciones geométricas de material dieléctrico aprovechen mejor la distribución de de la energía electromagnética y así mejor distribución de la temperatura Figura 4-5.

En la Figura 4-6 se mostrará la distribución de temperatura de varios arreglos geométricos del material donde se aprovechará la isometría del modelo delimitando las condiciones de frontera para tener menor tiempo de procesamiento Figura 4-7.

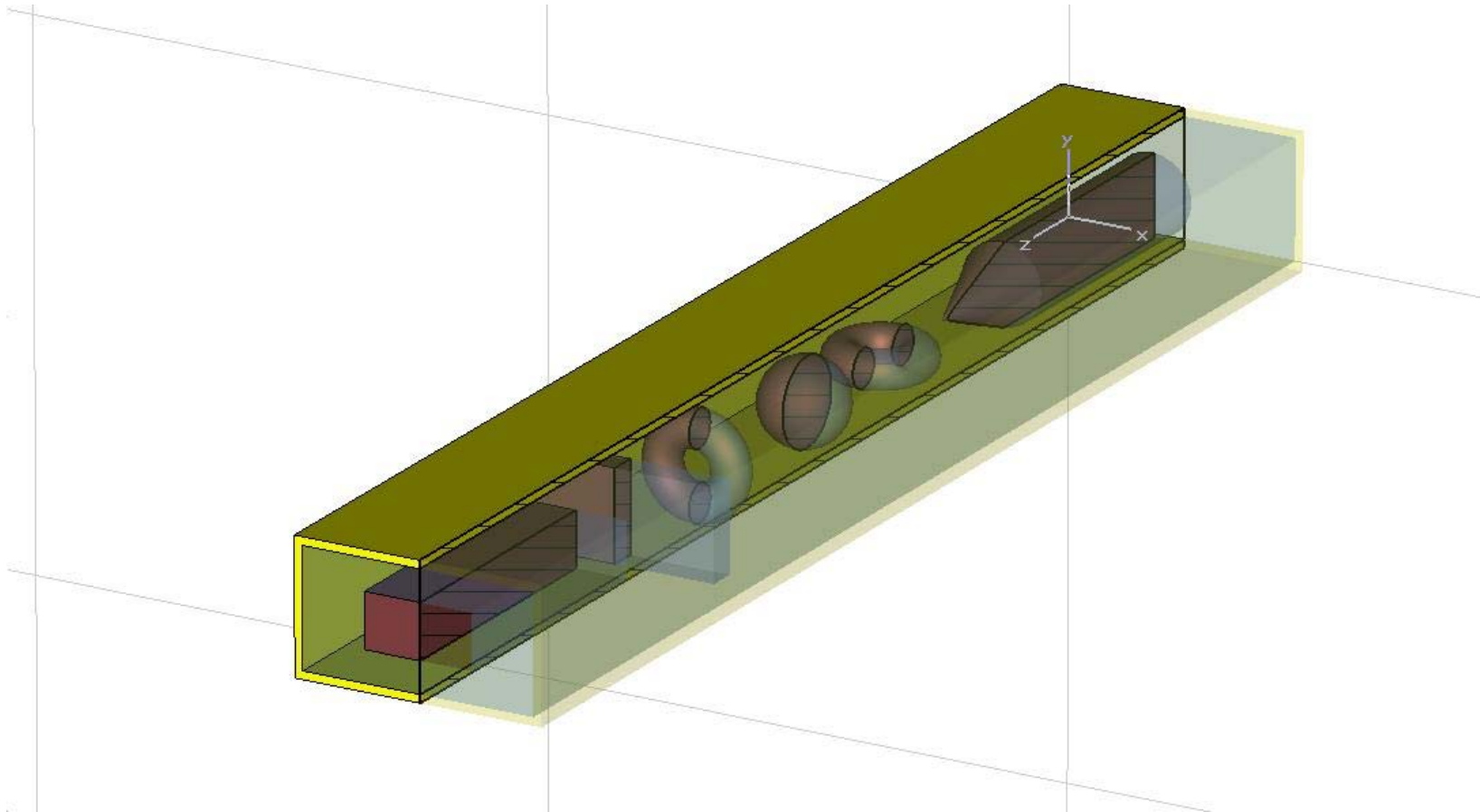


FIGURA 4-5: Posibles configuraciones geométricas de material dieléctrico.

Fuente: Autor.

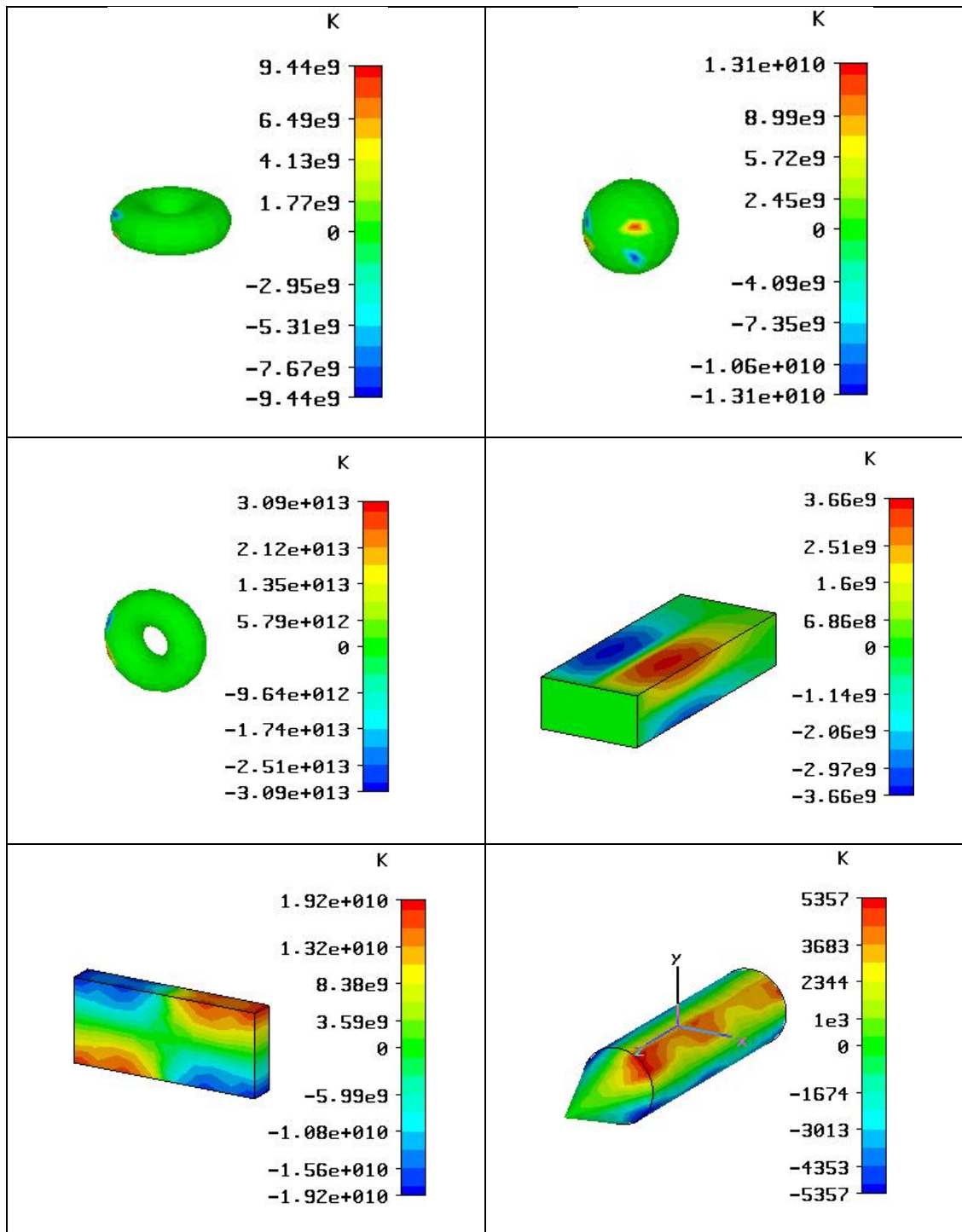


FIGURA 4-6: Distribución de temperatura de varios modelos geométricos.

Fuente: Autor.

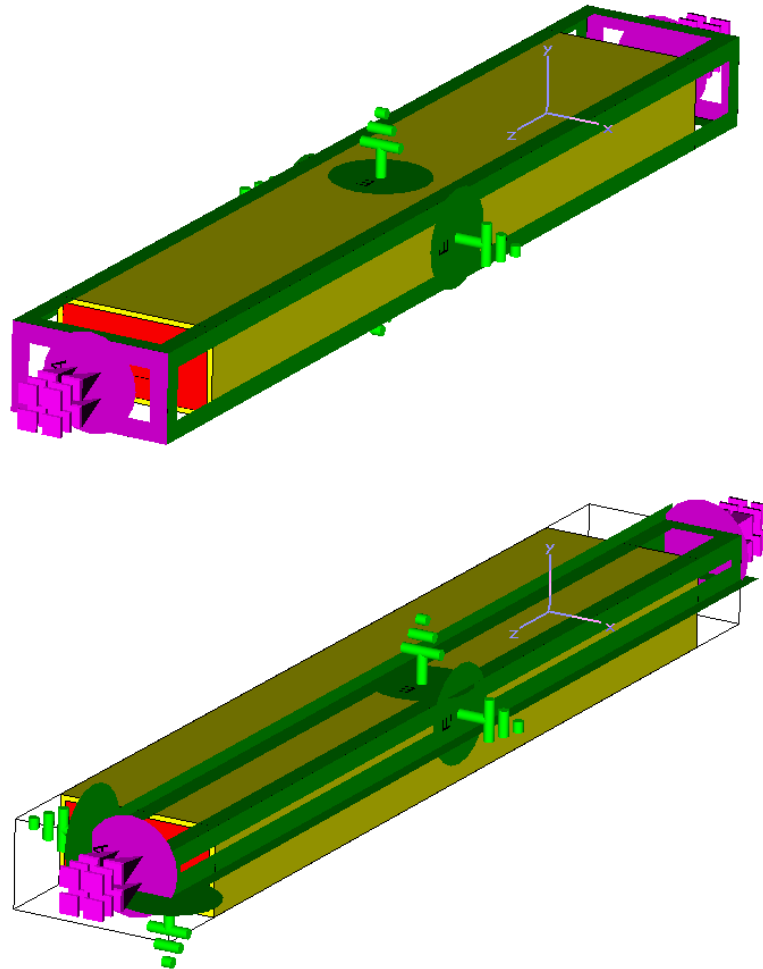


FIGURA 4-7: Cambio de condiciones de frontera para menor tiempo de procesamiento el análisis de temperatura.

Fuente: Autor.

Debido al cambio de condiciones de frontera y a la geometría regular de los materiales la región analizada se limita al primer cuadrante, como se muestra en la Figura 4-8.

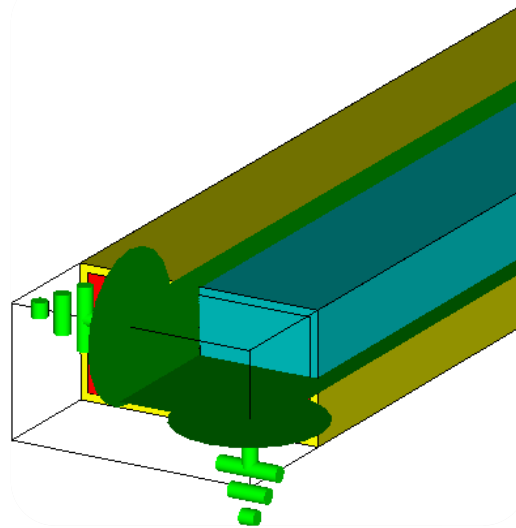


FIGURA 4-8: Nuevas condiciones de frontera.

Fuente: Autor.

Como se puede observar en la Figura 4-6, la mejor distribución de temperatura se da en aquellas figuras que intenten llenar la cavidad de la guía, esto es por la mayor interacción con la energía electromagnética. Esta distribución de temperatura se obtuvo realizando un análisis en estado estable, análisis que además predice las tasas de flujo de calor estables en el material. Cuando la energía de microondas interactúa con el material dieléctrico causa pérdidas térmicas, así, la corriente de campo dentro del material, dada por esta energía, se usó como parámetro esencial o fuente térmica en el análisis en estado estable.

La influencia de la geometría del producto es a menudo subestimado en comparación con la atención prestada a las propiedades dieléctricas. Los materiales dieléctricos con geometría de bloque son difíciles de calentar debido al sobrecalentamiento de los bordes y esquinas. Estos afectan a la distribución de energía a fin de que la energía se concentre alrededor de las esquinas o los bordes, Figura 4-9 y el área central tiende a permanecer fría. Cuanto más corta es la profundidad de penetración, más pronunciado es el sobrecalentamiento. Una geometría ovalada o circular es una forma de reducir este problema.

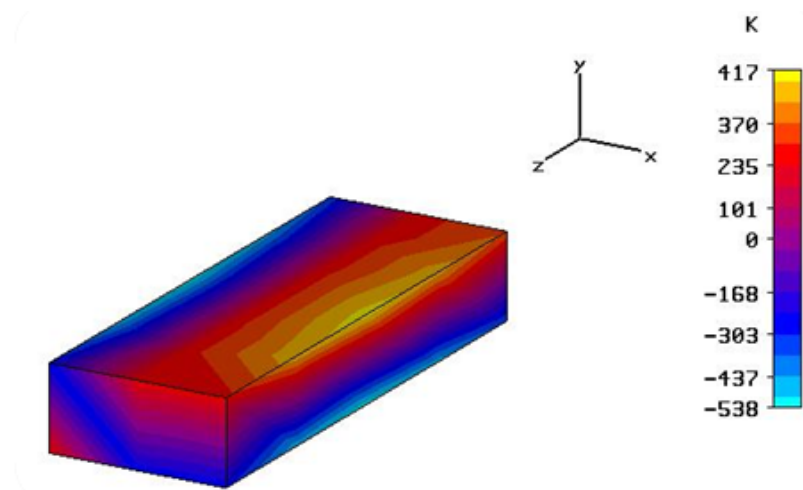


FIGURA 4-9: Energía concentrada alrededor de los bordes del material dieléctrico. Escala Reducida

Fuente: Autor.

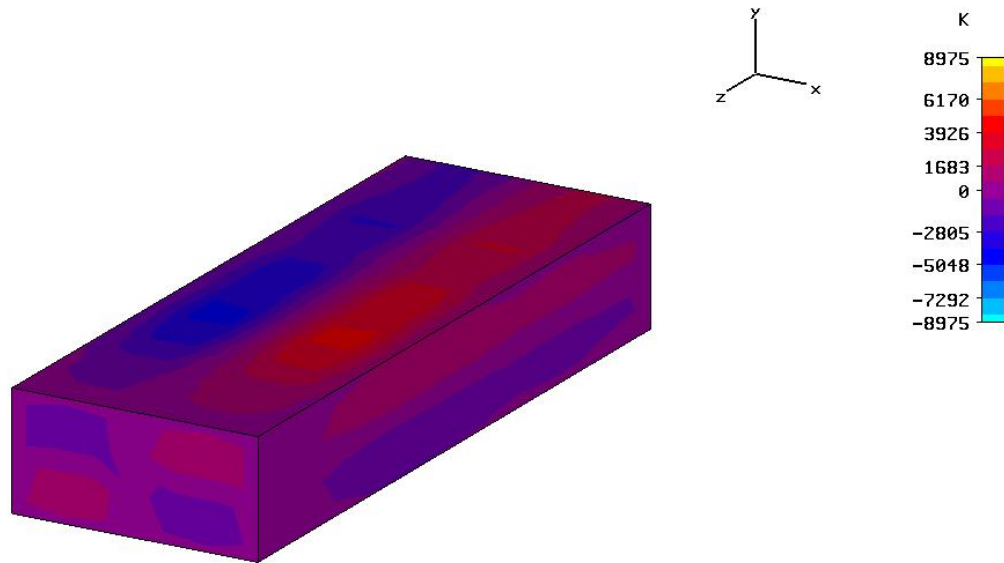


FIGURA 4-10: Temperatura del carburo de silicio ubicado en una guía de ondas rectangular. Escala aumentada

Fuente: Autor.

El análisis térmico se obtuvo con la fuente de energía ubicada en la dirección positiva de z . Las Figuras 4-9 y 4-10 muestran la temperatura en el carburo de silicio, recordando que la visualización real es la del primer cuadrante, resultado que se puede trasladar a cada uno de los cuatro cuadrantes simplemente cambiando las condiciones de frontera pero obviamente esto lleva a un tiempo de procesamiento mayor. Aquí se puede ver como se mencionó anteriormente que la distribución de energía en el área central tiende a permanecer fría.

Además de las propiedades electromagnéticas hay otros factores que afectan la forma en que los materiales dieléctricos se calientan con microondas. Entre estas propiedades se tiene las propiedades térmicas del dieléctrico, la temperatura inicial de la alimentación, el tamaño, la forma geométrica y la posición del producto dentro de la guía de ondas, al igual que la distancia de la fuente de alimentación dado que los materiales de las guías nos son conductores perfectos.

Después que la energía de microondas ha penetrado en el producto, dos propiedades térmicas (conductividad térmica y la capacidad térmica específica) determinan de qué manera el material dieléctrico se calienta. Cabe anotar que la velocidad de calentamiento depende de las propiedades térmicas mientras que la potencia absorbida de las propiedades dieléctricas del material y que es necesario un equilibrio tanto de las propiedades dieléctricas y térmicas con el fin de obtener una mejor distribución de la temperatura. Por lo general se ajusta la capacidad térmica específica en lugar de las propiedades dieléctricas [SUV02].

Una manera de comparar los resultados obtenidos en la simulación con los reportados en la literatura, es aprovechar la relación existente entre la constante dieléctrica relativa (ϵ'_r) y la longitud de onda en el espacio y en el material dieléctrico, como lo muestra la ecuación (69),

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_m} = \sqrt{\epsilon'_r} \tag{69}$$

donde,

λ_0 , es la longitud de onda en el espacio a la frecuencia de operación

λ_m , es la longitud de onda del campo electromagnético al interior del material

La teoría muestra que $|\epsilon'_r|$ para el carburo de silicio es cerca de 10,8, entonces:

$$\epsilon'_r = 3,285983$$

Por medio de la simulación se obtuvieron los datos cada una de las longitudes de onda

$$\lambda_m = 37,24mm$$

$$\lambda_0 = 0,12237mm$$

Así,

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_m} = 3,285983$$

$$|\varepsilon_r \%| = \frac{3,285983 - 3,285983}{3,285983} = 0,0107122$$

resultado que se ajusta casi de manera exacta al valor dado por la literatura. La Figura 4-9 muestra zonas de calentamiento máximo de 417 K, teniendo presente las condiciones de frontera tomadas; es un valor que se ajusta a valores expresados en trabajos similares, como el presentado por **[JOH05]**.

4.1. CONCLUSIONES

- Se desarrolló un análisis conceptual que permitió determinar que guía de onda es más apropiada para el calentamiento de materiales dieléctricos a una frecuencia de 2,45 GHz, presentando una descripción del como y el porqué escoger los parámetros principales que determinan una guía de onda.
- Los materiales dieléctricos con geometría de bloque presentan un sobrecalentamiento de los bordes y esquinas afectando la distribución de la energía; y a medida que la profundidad del bloque es más reducida el sobrecalentamiento es mas pronunciado. Para mejorar este problema es necesario utilizar objetos con geometrías circulares u ovaladas.
- Se utilizó software para simular guías de onda rectangulares y cilíndricas mostrando la propagación de los modos electromagnéticos y su respectiva atenuación cuando los parámetros son seleccionados coherentemente con el diseño presentado.
- Se eligió las guías de onda rectangulares para el calentamiento de materiales, dado que presenta mucho menos atenuación que las guías circulares a la frecuencia de calentamiento de 2,45GHz.
- Aunque las guías de onda circulares no son prácticas para el calentamiento de materiales, son bastante eficientes operando a frecuencias mayores a 10 GHz, frecuencias usadas en comunicaciones móviles; esto debido a que presentan menor atenuación que las guías de onda rectangulares.

4.2. RECOMENDACIONES

- Es necesario que la Universidad Industrial de Santander adecue o construya un laboratorio dedicado al estudio de microondas e interacción con la materia, para incentivar la producción de trabajos de grado, que apunten al crecimiento teórico y práctico de esta importante rama de la ingeniería.
- Se recomienda la ampliación de este proyecto e integración con un sistema total, de tal forma que sea posible una dar una mejor respuesta a los medios actuales de calentamiento para el estudio y producción de procesos.
- Se invita a la Universidad Industrial de Santander a comprar la licencia del software CST Studio Suite™ dado que es una de las herramientas más poderosas en el análisis electromagnético en la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [AFH63]** A.F. Harver, Microwave Engineering, Academic Press, New York, 1963.
- [COL91]** COLLIN Robert E. FOUNDATION FOR MICROWAVE ENGEENIERING. Segunda edición, John Wiley & Sons Inc. 1991.
- [DIB93]** N.I. Dib and L.P.B. Katehi, "Analysis of the transition from rectangular waveguide to shielded dielectric imagen guide using the finite-difference time-domain method," IEEE Microwave Guide Wave Lett., pp.327-329, Sept. 1993.
- [EHL03]** Ehlers.R. and Metaxas A.C., '3D FE Discontinuous Sheet for Microwave Heating', IEEE Transactions of Microwave Heating and Techniques, Vol 51, No.3, 718-726, March 2003.
- [FAT95]** Fathi, Z., R. S. Garard, M. T. DeMeuse, J. Clemens, and C. Saltiel, "Processing and modelling of select PMCs using variable frequency microwave irradiation," *Polym. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 72, 74–75, 1995.
- [GEO96]** George E. Ponchak. Design and Analysis of Transition from Rectangular Waveguide to Layered Ridge Dielectric Waveguide. IEEE Transaction on microwave theory and techniques. Vol 45. 1996.
- [GRA85]** Graham R. Development of and air to air heat exchanger with all ceramic internals. Ceramic in heat exchangers, Advances in Ceramics, American Ceramic Society, Vol 14, 1985.

[HAY01] HAYT William H.,BUCK Jhon A., ENGINEERING ELECTROMAGNETICS. Caurta edición, McGraw HILL. 2001.

[JOH05] GOMEZ, John. Modelado y simulación del calentamiento de bloques cerámicos en una guía de ondas. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2005.

[NAT94] National Research Centre (NRC), *Microwave Processing of Materials*,1–7,11 12,100,105,National Academy Press, National Materials Advisory Board,Commission on Engineering and Technical Systems,USA,1994.

[NER99] Neri Vela R.. Líneas de transmisión. McGraw Hill.1999

[MET93] Metaxas, A.C., Meredith, R., Industrial Microwave Heating, IEE, 1983 (reprinted 1993).

[MET96] METAXAS, A. C..Foundations of electroheat: a unified approach, John Wiley and Sons 1996

[POZ98] POZAR, David M., MICROWAVE ENGINEERING. Segunda edición, John Wiley & Sons Inc. 1998.

[RAI78] VILA, Raimundo y MUÑOS, Gustavo. Estudios básicos de las microondas y elaboración del manual para la práctica en el laboratorio de comunicaciones eléctricas. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, división de ciencias físico mecánicas departamento de electricidad y de electrónica. Tesis de grado 1978,

[RIS87] Risman, P.O., Ohlsson, T. & Wass, B. Principles and models of power density distribution in microwave oven loads. J. Microwave Power and Electromagnetic Energy 22: 193-198. 1987.

[ROD97] CORREA, Rodrigo. Secado de polímeros con microondas. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.1997

[SOU50] SOUTHWORTH George C. PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF WAVEGUIDE TRANSMISSION. Cuarta edición. D. Van Nostrand Company Inc. 1950.

[SUV02] Suvi Ryyänen. Microwave Heating Uniformity of Multicomponent Prepared Foods. University of Helsinki Department of Food Technology.2002.

[TEH93] Techcommentary. Industrial Microwaves Heating application. EPRI Center for materials fabrication Vol 4 N° 3. 1993

[TOR97] TORRES, Francois and JACKO, Bernard. Complete FDTD analysis of microwave heating process in frequency-dependent and temperature-dependent media. IEEE Transaction on microwave theory and techniques. Vol 45. 1997.

[TPRC67] Thermophysical properties of high temperature solid material. Purdue University. Y.S Touloukian. New York-1967.

[WIL94] William E., Lee D., Mark W. Ceramic microstructures property control by processing, Department of Engineering Materials and Sorby Center for Electron Microscopy; Sheffield University, Sheffield UK, primera edición, 1994

[3W1]

http://www.unicrom.com/topic.asp?cat_id=11&FORUM_ID=31&TOPIC_ID=1446&Topic_Title=Guias+de+Onda&Forum_Title=Otros+en+Telecomunicaciones

[3W2]

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/loranca_r_ya/capitulo3.pdf

[3W3]

http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Carburo_de_Silicio__.HTML

[3W4] <http://www.wa1mba.org/wavegd.htm>

[3W5] <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/siliconcarbide.cfm>

[3W6]

http://www.cernex.com/PRODUCTS_NEW/Tech_info/Circular%20Waveguide%20Sizes.pdf

ANEXO A

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE CST STUDIO SUITE™

Es un software para simulaciones electromagnéticas de alta y baja frecuencia, el cual se ha consolidado a través de los años, como uno de los más eficientes y precisos, dando soluciones computacionales a la investigación y el diseño electromagnético.

Consta de los siguientes módulos:



CST MICROWAVE STUDIO®, es una herramienta especializada en simulaciones electromagnéticas, en la cual se da solución de manera exacta y rápida, a problemas de alta frecuencia. Las aplicaciones abarcan áreas como: Diseño Inalámbrico (bluetooth), Comunicaciones Móviles, Antenas, Filtros entre otros.



CST EM STUDIO™, es dedicado para las simulaciones de dispositivos estáticos y de baja frecuencia. CST EMS presenta una variedad de soluciones para abordar la electrostática, magnetostática, flujo de corriente, e incluso problema de temperatura estacionarios.

Incluye aplicaciones como activadoras, reductoras, generadores, motores, sensores.



CST PARTICLE STUDIO™, es una herramienta altamente especializada para una simulación completa consistente del movimiento libre de partículas cargadas.

Incluye aplicaciones como disparador de electrones, magnetrones, y tubo de rayos catódicos.



CST DESIGN STUDIO™, permite particionar sistemas complejos en componentes más pequeños, y así obtener mucha mas velocidad en el análisis, optimizando estructuras complejas.

Todos los módulos son accesibles con:



CST DESIGN ENVIRONMENT.

En este proyecto se utilizará CST MICROWAVE STUDIO® [CST MWS], ya que como se dijo anteriormente, es quien ofrece soluciones rápidas y eficientes a problemas de alta frecuencia, como es en este caso, las microondas.

Para los usuarios de CST MICROWAVE STUDIO® [CST MWS] se ofrecen dos vistas de sus estructuras: la vista geométrica tradicional en 3D y una vista esquemática.

En la vista esquemática las terminales son usadas para representar todos los puertos y modos. Esto permite a una estructura en 3D ser incluida extremadamente rápido en una representación de circuito de RF/MW. Esto es adicionalmente posible para clasificar estructuras en 3D en pequeñas partes, enlazar los segmentos en una vista esquemática. Esto puede ahorrar una tremenda cantidad de tiempo especialmente para la optimización de estructuras complejas.

Una de las mayores ventajas competitivas de CST esta basada propiamente en la perfecta aproximación de los límites [tecnología PBA].

Considerando que la malla⁵ de escalera es bastante eficaz para un gran numero de celdas, tiene un inconveniente mayor cuando viene la aproximación geométrica de estructuras redondeadas.

El enmallado Tetrahedral tiene más o menos las mismas debilidades. PBA combina las ventajas de ambos acercamientos normales, y ofrece una solución superior para muchas aplicaciones.

El software CST STUDIO SUITE®, además, proporciona un extensivo rango de soluciones ajustado para aplicaciones de ancho de banda en simulaciones EM de 3D.

- HF Dominio del tiempo
- HF Dominio de la frecuencia
- Eigenmode
- Reducción de orden para modelo
- Análisis de Modos electromagnéticos
- Electrostática
- Magnetostática
- Flujo de corriente
- Temperatura fija

⁵ *forma y cantidad de celdas en que se puede dividir una estructura para perfeccionar los análisis como los resultados obtenidos.*

Requisitos de instalación

Requerimientos de Software

- El software corre bajo Windows 2000 or Windows XP (recomendado).



Requerimientos de Hardware

- Intel Pentium o superior, IBM PC Compatible (Procesador Intel recomendado)
- Tarjeta grafica OpenGL compatible
- unidad de DVD
- 256 MB RAM (1 GB recomendado)
- 5 GB de espacio libre en el disco (20 GB recomendado)

Opciones de licencia

El software puede tener licencia ya sea como una sola versión para PC o como una versión de red. La licencia para un solo PC, permite que el software sea inicializado en un solo PC, las veces que la licencia este disponible. La licencia de red permite que el software sea inicializado en varios PC que estén conectados a la licencia del servidor en una red de área local.

Iniciar con CST SUDIO SUITE

Iniciar con CST DESIGN ENVIRONMENT™, mostrado con el icono  en el que se selecciona el modulo CST MICROWAVE STUDIO® que se muestra con el icono  en la ventana que aparece en la FIGURA 1. A continuación el software solicita la plantilla a utilizar, figura 2, donde se especificará el tipo de aplicación mas apropiada, con las unidades y funciones esenciales para cada aplicación.

En este proyecto se trabaja con microondas y guías de onda, así que se escoge la plantilla *waveguide coupler*, cuyas unidades por defecto son: longitud en mm, frecuencia en GHz, material PEC (conductor perfecto) y fronteras eléctricas.

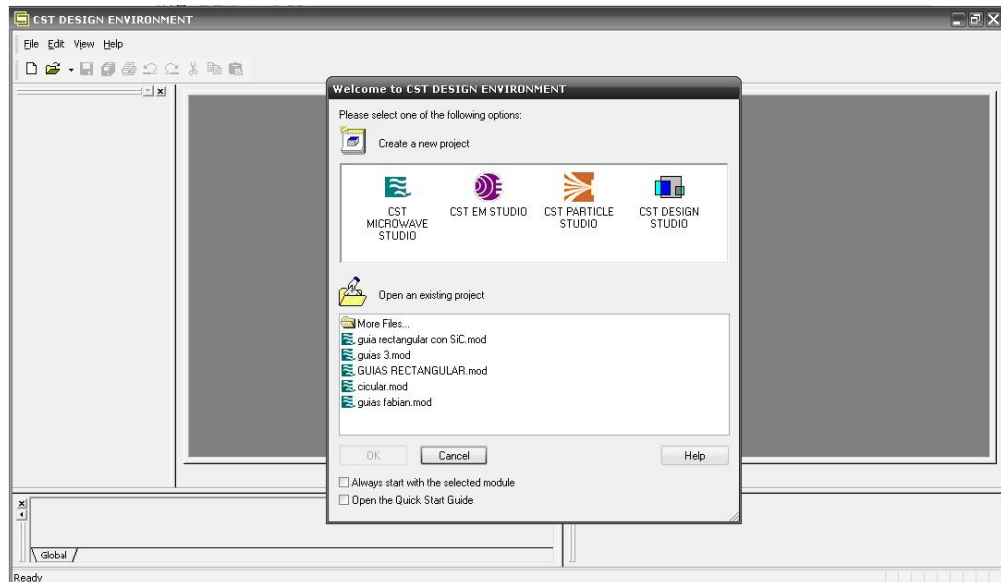


FIGURA 1. Pantalla de bienvenida

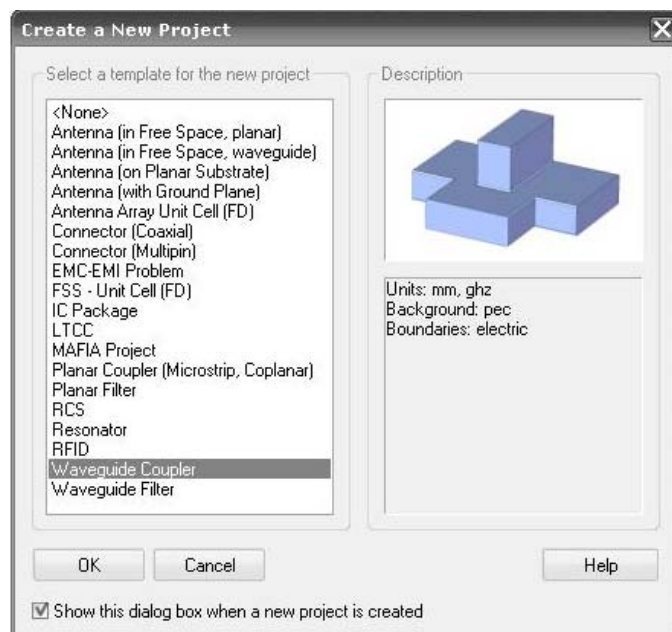


FIGURA 2. Plantillas básicas para un nuevo proyecto

El cuadro de diálogo de la figura 2 siempre aparecerá cuando un nuevo proyecto es creado.

Aquí puede seleccionar una de las plantillas predefinidas para configurar automáticamente los valores por defecto adecuados para el tipo particular de dispositivo que desea analizar. Aunque todos estos ajustes se pueden cambiar manualmente en cualquier momento, es más conveniente empezar con buen valor por defecto, sobre todo para los nuevos usuarios. Sin embargo, como un usuario avanzado puede personalizar las plantillas predefinidas o añadir otras nuevas. A continuación aparecerá la ventana principal (escritorio de trabajo), en el que se muestra cada una de las partes que la componen.

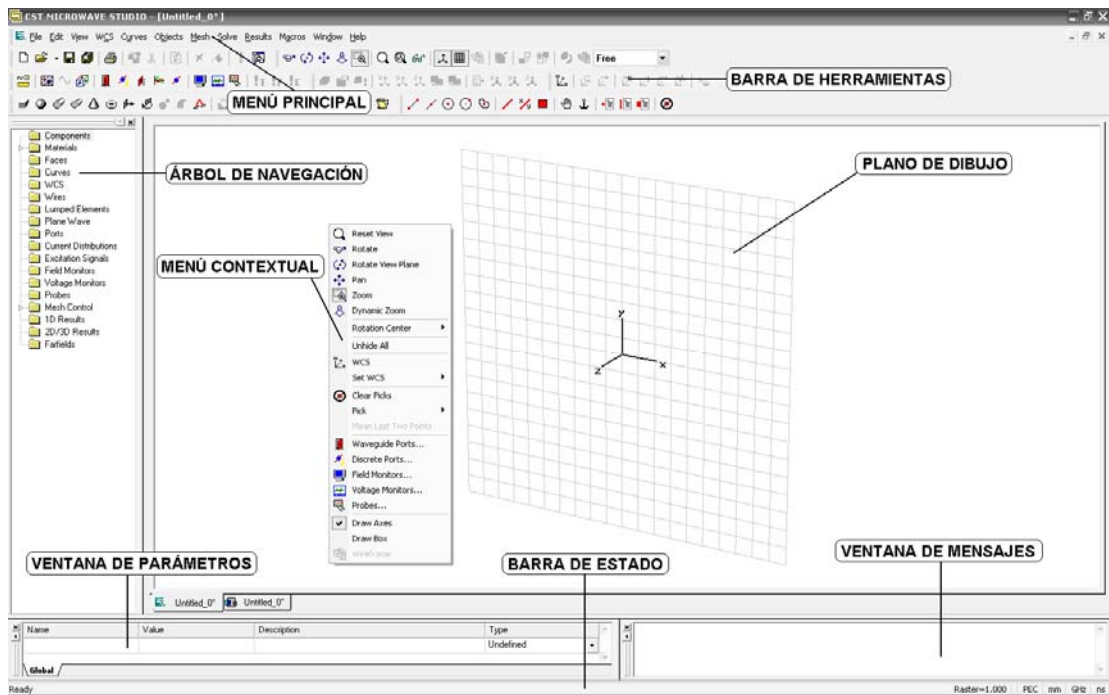


FIGURA 3. Ventana principal

Árbol de navegación

El árbol de navegación es una parte esencial de la interfaz de usuario. Desde aquí se puede acceder a los elementos estructurales, así como a los resultados de la simulación.

Menú contextual

Los menús contextuales son una forma flexible de acceder a los comandos de menú de uso frecuente para el contexto actual. El contenido de este menú (que se puede abrir pulsando el botón derecho del ratón) cambia dinámicamente.

Plano de dibujo

El plano de dibujo, es el plano en el cual se dibuja la estructura en estudio. Como el ratón no es más que un localizador de 2D, 3D, aun con la definición de las estructuras, las coordenadas deben ser proyectadas en el plano de dibujo con el fin de especificar una ubicación en 3D.

Ventana de parámetros

La ventana de parámetros muestra una lista de todos los parámetros previamente definidos, junto con sus valores actuales.

Ventana de mensajes

La ventana de mensajes muestra la información de texto, de los procesos en curso.

Los otros elementos de la interfaz de usuario son estándar para una aplicación basada en Windows.

Como crear una guía de onda

1. En menú principal o en la barra de herramientas, activar la herramienta “*Brick*”, que aparece en la barra de herramientas o en *Objects /Basic*

Shapes /Brick, figura 4; cuando se desea realizar una guía de onda rectangular.

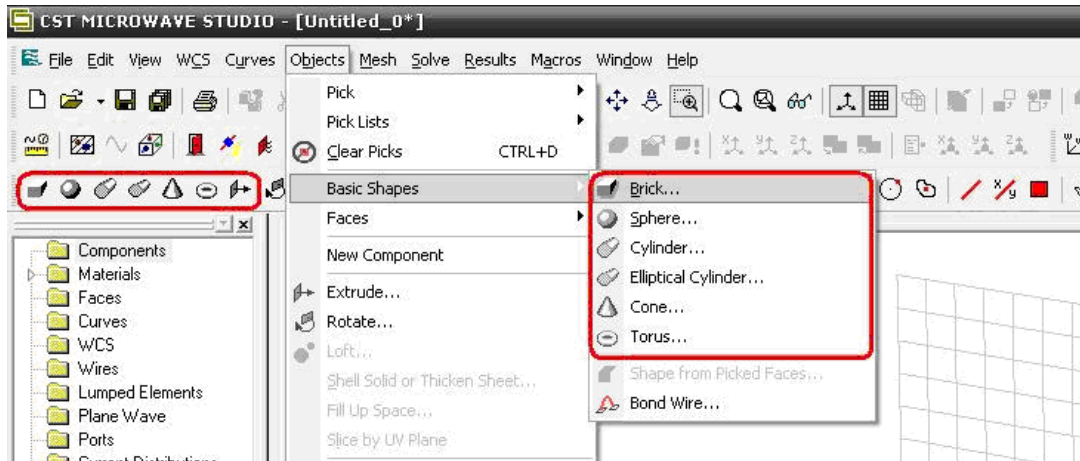


FIGURA 4 Como activar los objetos básicos

2. Colocar un punto de partida haciendo doble clic en una ubicación deseada en el plano de dibujo.
3. Ahora se selecciona la esquina opuesta de la base de la caja en el dibujo plano haciendo doble clic en él.
4. Luego, se define la altura del ladrillo arrastrando el ratón. Hacer doble clic para fijar la altura de la de ladrillo.
5. Por último, una caja de diálogo que se abrirá mostrando los valores numéricos de la figura en las todas las coordenadas. Aquí se puede ver el numero de componente y escoger el tipo de material con el va ha ser creada figura, en donde se aparecen por defecto, crear un nuevo material, cargar una material de la librería de materiales de software, PEC (conductor perfecto) y vacío. Escoger vacío para el material que se alojara en el interior

de la guía. En el caso de escoger nuevo material el software muestra la siguiente ventana:

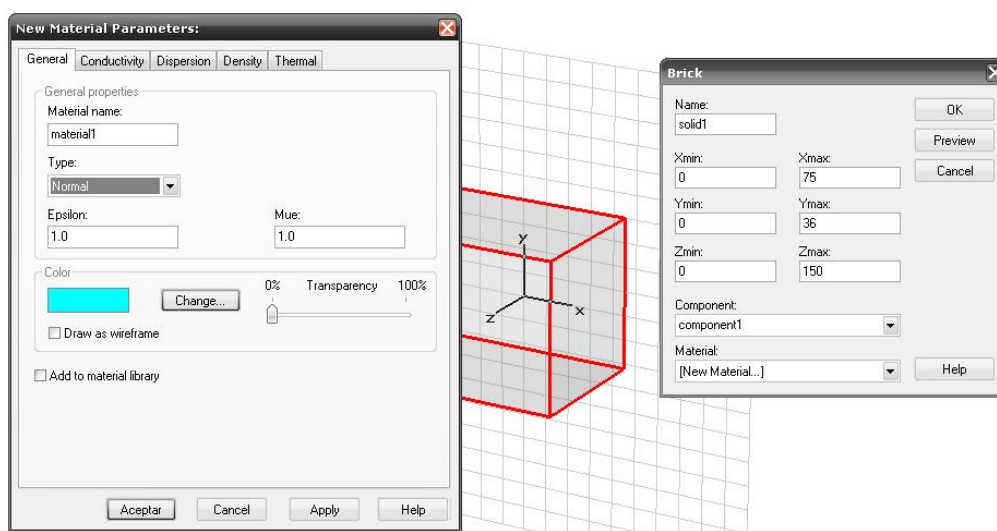


FIGURA 5.

En donde se muestra una serie de pestañas como, conductividad, dispersión, densidad, térmica con las que se puede representar un material que va ser expuesto a radiación electromagnética y no se encuentre en la librería de materiales del software.

El proceso se ve como sigue:

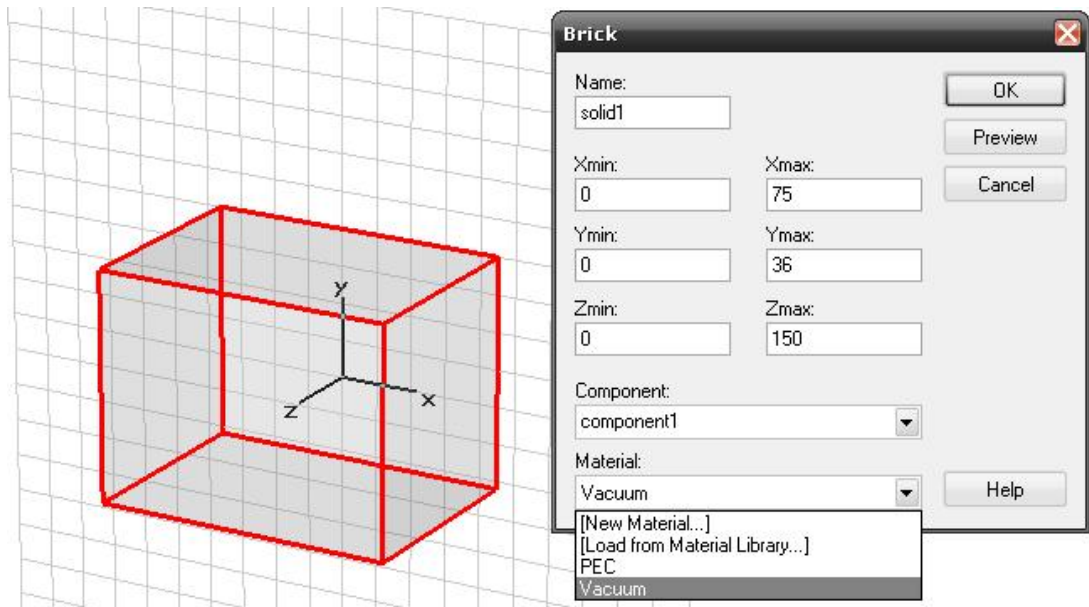


FIGURA 6.

Después de haber creado la figura aparecerá así:

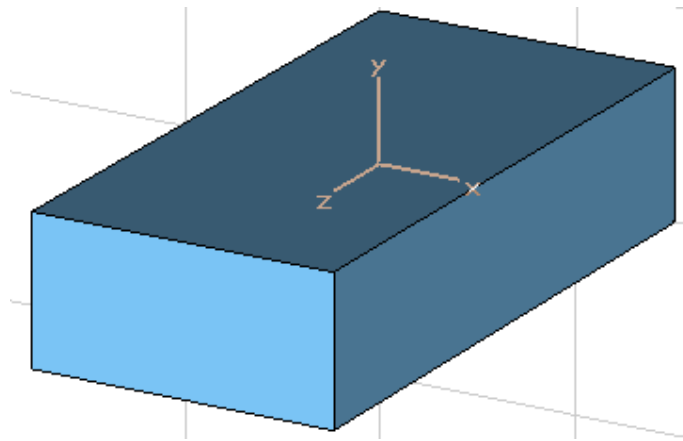


FIGURA 7. Espacio confinado dentro de la guía

Al realizar el mismo procedimiento anterior utilizado para crear la figura 7, se obtiene la estructura con la que esta hecha la guía y que va a contener la figura 7.

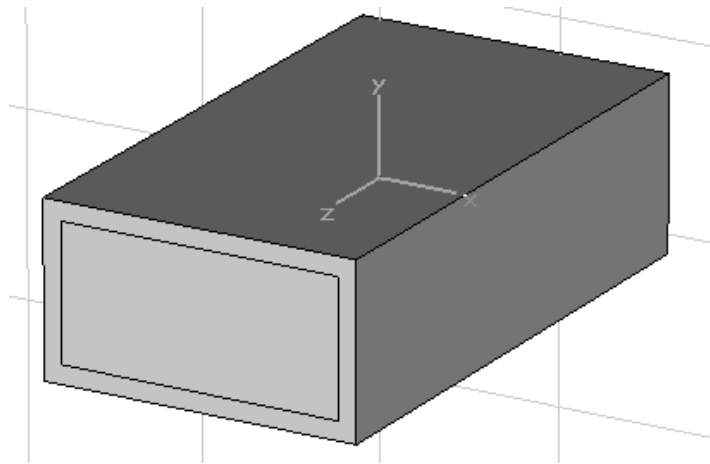



FIGURA 8.

Es claro ver que hay una intersección de figuras, de esta manera, para lograr el objetivo que se desea, se requiere utilizar la herramienta *boolean* que permite hacer operaciones entre objetos, tales como suma, resta, intersección e inserción entre objetos.

Al hacer doble click sobre la nueva figura se activaran las opciones de *boolean* en el que se debe seleccionar *boolean insert (/)*, mostrado por el icono . A continuación, en el árbol de navegación se escoge en la carpeta *components* escoger *solid1*, y así finalizar dando click en *Enter*.

La figura 9 mostrara el procedimiento hasta el momento.

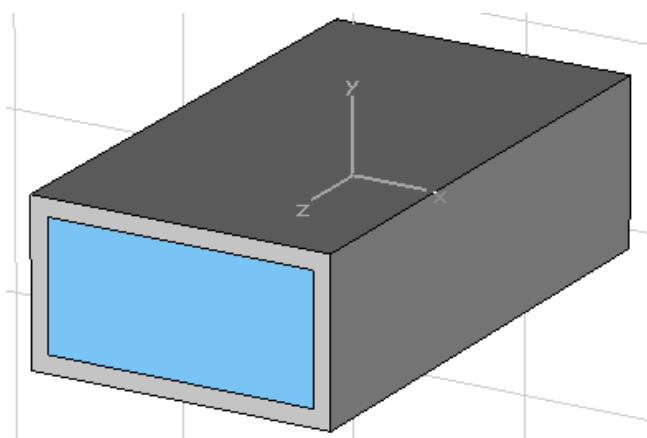


FIGURA 9.

Hasta el momento se ha creado la forma básica de una guía de ondas rectangular.

Ahora, para principiantes en el manejo de este software, se puede utilizar el *quickstart guide*, encontrada en la ayuda del menú principal, donde se dará una guía de todos los procesos a utilizar en el diseño de este tipo de sistemas.

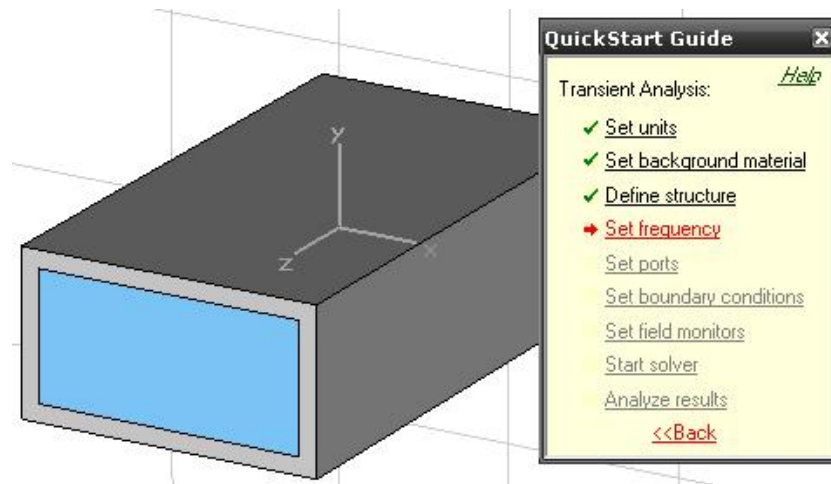


FIGURA 10.

Guía de onda terminada. Presentando la guía quickstart que da los pasos para la simulación del problema.