

**SIMULACION DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO DE UN SOLIDO
MEDIANTE USO DE SOFTWARE COMERCIAL**

JOSÉ FELIPE ESPINOSA ORJUELA

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

2016

**SIMULACION DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO DE UN SOLIDO
MEDIANTE USO DE SOFTWARE COMERCIAL**

JOSÉ FELIPE ESPINOSA ORJUELA

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

Director

RODRIGO CORREA CELY

Profesor Titular Laureado

Codirector

IVAN AMAYA CONTRERAS

PhD. Ingeniera Electrónica

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

2016

A mis padres y hermana, quienes me brindaron su apoyo y su consejo en todo momento y gracias a los cuales se cumple uno de mis sueños.

A mis amigos con los cuales pase los mejores momentos de mi vida universitaria, alegrías, tristezas, fiestas, viajes, noches de estudio y de los cuales aprendí mucho.

Y a todas las personas que a su manera me ayudaron a ser la persona que soy ahora.

JOSE FELIPE ESPINOSA

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Al profesor Rodrigo Correa Cely, director del proyecto, por su apoyo, confianza, y por tomarse el arduo trabajo de transmitirme todos sus conocimientos acerca del tema.

Al doctor Ivan Amaya Contreras, codirector del proyecto quien me brindó su apoyo y conocimiento.

A la Universidad Industrial de Santander por ser el pilar de nuestro desarrollo como ingenieros

A la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por ser participe en mi formación y me permitió tener un progreso tanto intelectual como personal.

RESUMEN

TITULO: SIMULACION DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO DE UN SOLIDO MEDIANTE USO DE SOFTWARE COMERCIAL.*

AUTOR: JOSÉ FELIPE ESPINOSA ORJUELA.**

PALABRAS CLAVE: Microondas, Carburo de Silicio, Guía de onda, Calentamiento.

DESCRIPCIÓN:

El calentamiento a través de microondas y la interacción de estas con diferentes materiales es un área que se ha venido desarrollando y su aplicabilidad en la industria se ha incrementado en los últimos años, gracias en gran medida al desarrollo de software especializado que permite estudiar este fenómeno y crear diseños óptimos de instrumentos para resolver problemas sin necesidad de su construcción previa.

Una de las áreas de mayor interés es el calentamiento de materiales dieléctricos que ha tomado gran importancia especialmente por la variedad de materiales y la componente de campo con la que interactúan. Se hace necesario tener instrumentos capaces de transportar esta energía a un punto específico reduciendo las pérdidas en otros materiales además de saber la disposición correcta de los mismos para obtener los mejores resultados.

Los nano materiales ferromagnéticos poseen propiedades que facilitan su aplicación en la industria farmacéutica como la destrucción selectiva de células cancerígenas u otro tipo de agentes nocivos para el organismo. Por lo cual, conocer las propiedades y el comportamiento al interactuar con campos electromagnéticos permite optimizar el diseño de los instrumentos.

En el desarrollo de este proyecto se analizó el problema de calentamiento selectivo de una estructura dopada con un nano material ferromagnético irradiado con ondas electromagnéticas, donde se simularon diferentes distribuciones del dopado y concentraciones, dando como resultado los respectivos perfiles de temperatura, parámetros S y distribución de intensidad de campo magnético.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas; Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones; Director: Rodrigo Correa Cely. Profesor Titular Laureado; Codirector: Ivan Amaya Contreras, PhD. Ingeniera Electrónica

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC HEATING SOLID THROUGH COMMERCIAL USE SOFTWARE.*

AUTHOR: JOSÉ FELIPE ESPINOSA ORJUELA.**

KEY WORDS: Microwave, Silicon Carbide, Waveguide, Heating.

DESCRIPTION:

Heating through microwave and interaction of these different materials is an area that has been developed and its applicability in the industry has increased in recent years, thanks largely to the development of specialized software that allows to study this phenomenon and create optimal designs to solve problems without their prior construction, thus reducing costs.

One area of interest is the heating of dielectric materials in recent years has become very important especially for the variety of materials and field component with which they interact. It is necessary to have instruments capable of carrying this energy to a specific point reducing losses in other materials besides knowing the correct arrangement thereof for best results.

Nano ferromagnetic materials have properties that facilitate their application in the pharmaceutical industry as the selective destruction of cancer cells or other types of agents harmful to the body. Therefore, to know the properties and the behavior when interacting with electromagnetic fields allows to optimize the design of the instruments.

In the development of this project we analyzed the problem of selective heating of a doped structure with a nano ferromagnetic material irradiated with electromagnetic waves, where different doping distributions and concentrations were simulated, resulting in the respective temperature profiles, S parameters and distribution Of magnetic field strength.

* Graduation project

** Faculty of Mechanical Physical Engineering; School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering; Director: Rodrigo Correa Cely. Professor Titular Laureate; Co-director: Ivan Amaya Contreras, PhD. Electronic Engineer

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO	16
1.1 EL PROBLEMA.....	16
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
2. MARCO TEORICO	17
3. SOFTWARE UTILIZADO	18
4. ESTRUCTURA IMPLEMENTADA	20
4.1 OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA	22
4.1.1 Parametrización de los modelos.....	22
5. SIMULACIONES DE CONFIGURACION T RECTANGULAR	24
5.1 ESTRUCTURA SIN AISLANTE TERMICO.....	24
5.1.1 Simulación electromagnética.....	24
5.1.2 Simulación termica.....	27
5.1.3 Estructura con mayor concentración en la parte superior de la muestra.	32
5.1.3.1 Simulación electromagnética.....	32
5.1.3.2 Simulación termica.....	34
5.2 DISTRIBUCIÓN DEL DOPADO CON AISLANTE TERMICO	38
5.2.1 Simulación electromagnética.....	39
5.2.2 Simulación termica.....	40
5.2.3 Estructura con dopado concentrado en la región superior de la muestra.	43
5.2.3.1 Simulación electromagnética.....	43

5.2.3.2 Simulación termica.....	44
5.3 VARIACION EN LA CONCENTRACION DEL MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	46
5.3.1 Dopado concentrado en el centro de la muestra.	46
5.3.1.1 Resultados electromagnéticos.	47
5.3.1.2 Resultados termicos.....	48
5.3.2 Mayor concentración en el centro de la muestra.....	49
5.3.2.1 Resultados electromagnéticos.	50
5.3.2.2 Resultados termicos.....	51
5.3.3 Maxima concentración en el centro de la muestra.	52
5.3.3.1 Resultados electromagnéticos.	53
5.3.3.2 Resultados termicos.....	54
5.4 DISEÑO NO SIMETRICO DE CONFIGURACIÓN T PLANO E.	55
5.4.1 Simulación electromagnética.	55
5.4.2 Simulación termica.....	57
5.5 DISMINUCIÓN DE LA POTENCIA APLICADA.....	59
5.6 VARIACIÓN EN LA FRECUENCIA DE LA ONDA ELECTROMAGNETICA APLICADA	61
5.6.1 Simulación electromagnética.	61
5.6.2 Simulación termica.....	62
5.7 VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN	63
6. CONCLUSIONES	66
7. RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS	69
BIBLIOGRAFIA.....	71

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estratificación del material ferromagnético.	21
Figura 2. Configuración T rectangular implementada.	21
Figura 3. Parametrización del modelo.....	23
Figura 4. Distribución de campo magnético en el interior de configuración T rectangular.	25
Figura 5. Parámetro S11 de la guía de onda.	25
Figura 6. Parámetro S21 de la guía de onda	26
Figura 7. Parámetro S31 de la guía de onda	26
Figura 8. Gráfico de consumo de potencia por material.....	27
Figura 9. Perfil de temperaturas por capas de la muestra.	27
Figura 10. Perfil de temperatura de la guía de onda.	28
Figura 11. Perfil de temperatura de las placas de cuarzo.	28
Figura 12. Perfil frontal de temperatura de la placa de cuarzo.....	29
Figura 13. Perfil posterior de temperatura de la placa de cuarzo.....	29
Figura 14. Absorbedores electromagnéticos y su perfil de temperaturas.	30
Figura 15. Perfil de temperatura frontal de los absorbentes electromagnéticos.	30
Figura 16. Perfil de temperatura posterior de los absorbentes electromagnéticos.....	31
Figura 17. Potencia medida en los puertos de la configuración T plano E.....	31
Figura 18. Distribución de campo magnético en la guía de onda.	32
Figura 19. Parámetro S11.....	32
Figura 20. Parámetro S21.....	33
Figura 21. Parámetro S31.....	33
Figura 22. Potencia consumida por las capas de material dopado.....	34
Figura 23. Distribución de temperatura en la guía de onda.	34
Figura 24. Perfil de temperatura por capas.....	35

Figura 25.	Perfiles de temperatura en el cuarzo.	35
Figura 26.	Perfil frontal de temperatura en la placa de cuarzo.....	36
Figura 27.	Perfil posterior de temperatura en la placa de cuarzo.....	36
Figura 28.	Perfiles de temperatura en los absorbedores electromagnéticos.	37
Figura 29.	Perfil de temperatura frontal de un absorbedor.....	37
Figura 30.	Perfil de temperatura posterior del absorbedor electromagnético.....	37
Figura 31.	Potencia en los puertos de la configuración T plano E.	38
Figura 32.	Modelo con aislante térmico.	39
Figura 33.	Distribución de campo magnético.	39
Figura 34.	Potencia absorbida en las capas de material ferromagnético.....	40
Figura 35.	Distribución de temperatura.	40
Figura 36.	Perfil de temperatura por capas en la muestra.	41
Figura 37.	Perfil de temperatura en las placas de cuarzo.	41
Figura 38.	Perfil de temperatura en los absorbedores electromagnéticos.	42
Figura 39.	Potencia en los puertos.....	42
Figura 40.	Distribución de campo magnético con dopado invertido.....	43
Figura 41.	Potencia absorbida por las capas de material ferromagnético.....	44
Figura 42.	Distribución de temperatura en el sistema.	44
Figura 43.	Distribución de temperatura en la muestra de interés.....	45
Figura 44.	Distribución de temperatura en las placas de cuarzo.	45
Figura 45.	División de potencia en la configuración T plano E.....	46
Figura 46.	Distribución del material ferromagnético en la muestra	47
Figura 47.	Distribución del campo magnético	47
Figura 48.	Potencia absorbida por los materiales	48
Figura 49.	Perfil de temperatura del sistema.	48
Figura 50.	Perfil de temperatura de la muestra.	49
Figura 51.	Perfil de temperatura de las placas de cuarzo.	49
Figura 52.	Distribución del material ferromagnético en la muestra.	50
Figura 53.	Distribución de campo magnético.	50
Figura 54.	Potencia absorbida	51

Figura 55. Distribución de temperatura	51
Figura 56. Distribución de temperatura en la muestra	52
Figura 57. Distribución del material ferromagnético en la muestra.	52
Figura 58. Distribución de campo magnético.	53
Figura 59. Potencia absorbida	53
Figura 60. Perfil de temperatura del sistema.	54
Figura 61. Perfil de temperatura de la muestra.	54
Figura 62. Distribución de campo magnético en la guía con configuración asimétrica.....	56
Figura 63. Parámetros S.....	56
Figura 64. Perfil de temperatura del sistema.	57
Figura 65. Potencia absorbida por material.	57
Figura 66. Distribución de temperatura por capas en la muestra.....	58
Figura 67. Perfil de temperatura en la placa de cuarzo.....	58
Figura 68. Potencia en los puertos del sistema.	59
Figura 69. Perfil de temperatura del sistema.	60
Figura 70. Perfil de temperatura por capas en la muestra	60
Figura 71. Distribución de campo magnetico a 930 [MHz].....	61
Figura 72. Parámetros S.	62
Figura 73. Potencia absorbida por material a 930 [MHz].	62
Figura 74. Perfil de temperatura del sistema	63
Figura 75. Perfil de temperatura de la muestra.	63
Figura 76. Perfil de temperatura del sistema con 60 segundos de radiación.....	64
Figura 77. Perfil de temperatura del sistema con 30 segundos de radiación.....	64
Figura 78. Perfil de temperatura del sistema con 10 segundos de radiación.....	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas de las alternativas de software comercial.....	18
Tabla 2. Propiedades del material ferromagnético utilizado.....	21
Tabla 3. Variables.	22
Tabla 4. Parámetros óptimos.	23
Tabla 5. Metodología utilizada en el desarrollo del problema.	24

INTRODUCCION

La utilización de ondas electromagnéticas para calentar materiales y estructuras presenta gran cantidad de aplicaciones. Su aplicación en áreas como la medicina y bioingeniería exige tener diseños adecuados para solo interactuar con las áreas de interés. Por tanto, se utilizan programas de simulación que permiten diseñar estas estructuras y estudiar su interacción con la materia.

Algunos materiales ferromagnéticos se utilizan en la medicina para la destrucción de tumores por hipertermia, por tanto, es necesario estudiar la interacción de dichos materiales con los campos electromagnéticos para su correcta aplicación en el cuerpo humano y evitar lesiones.

En el capítulo tres del presente documento se presentan alternativas de software comerciales que permiten simular estos sistemas, sus principales ventajas y desventajas y software seleccionado para desarrollar las simulaciones.

En el capítulo cuatro se explica la estructura propuesta y las características de la misma con el fin de simular el calentamiento de un material ferromagnético irradiado con ondas electromagnéticas.

En el capítulo cinco se desarrollan las simulaciones electromagnéticas y térmicas, variando la distribución del material ferromagnético, aislamiento termico, su concentración, la potencia de las ondas electromagnéticas, el tiempo de exposición a las mismas y la simetría de la estructura propuesta, con el fin de estudiar los efectos de estas variables en la distribución de temperatura y el comportamiento del sistema.

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 EL PROBLEMA

“Es posible predeterminar el perfil de temperatura y la distribución de campos en una estructura sólida, parcialmente dopada con un material ferromagnético e irradiada con ondas electromagnéticas de frecuencia variable conocida”.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La utilización de materiales ferromagnéticos para estimular el calentamiento a través de la absorción de ondas electromagnéticas es un área con un potencial de aplicación muy amplio (1). Poder simular el este proceso nos permite diseñar estructuras que garanticen la correcta aplicación de los campos electromagnéticos y la efectiva distribución de materiales. Así planteado el problema anterior se tienen los siguientes objetivos:

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Simular el calentamiento electromagnético de un sólido mediante software de uso comercial.

1.3.2 Objetivos específicos. El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Seleccionar un software de uso comercial disponible en la UIS y que cumpla con los requerimientos para la solución del problema planteado.
- Plantear un diseño de guía de onda con características óptimas para el calentamiento de un material con propiedades dieléctricas conocidas.
- Realizar las simulaciones y análisis de resultados.

2. MARCO TEORICO

Con la finalidad de simplificar la lectura del documento y reducir la extensión del mismo, no se incluirá el desarrollo conceptual. Se sugiere la lectura de los numerales (2), (3), (4) de la bibliografía, donde se encuentra la teoría referente a ondas electromagnéticas y guías de onda.

3. SOFTWARE UTILIZADO

En la siguiente tabla 1 se realiza una comparación entre los software comerciales de mayor trayectoria en el mercado, presentando sus ventajas y desventajas en aplicaciones que involucran ondas electromagnéticas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las alternativas de software comercial.

SOFTWARE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CST STUDIO SUITE	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil integración de los módulos electromagnéticos y térmicos. • Permite solucionar los problemas tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia • Permite parametrizar los diseños para su posterior optimización con diferentes métodos. • La documentación del software es completa y presenta tanto tutoriales como ejemplos básicos. • La Universidad Industrial de Santander actualmente cuenta con la licencia del software. • Posee una interfaz amigable al usuario lo que facilita su uso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los métodos de optimización en su mayoría son estocásticos lo cual puede generar alto consumo de recursos computacionales y elevados tiempos de simulación. • Para problemas complejos y opciones avanzadas no posee suficiente documentación que facilite el aprendizaje sobre el software.
COMSOL MULTIPHYSIC	<ul style="list-style-type: none"> • Permite integrar una gran cantidad de fenómenos físicos en una misma simulación. • Presenta una documentación completa y una gran cantidad de tutoriales debido a su trayectoria en el mercado • Permite parametrizar los diseños para su posterior optimización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta una interfaz compleja lo que dificulta el trabajo con el software. • Se necesitan buenos recursos computacionales para llegar a las soluciones en un tiempo moderados por lo que impide su utilización en plataformas de uso común. • La Universidad Industrial de Santander no cuenta con la licencia por lo que se hace necesaria su adquisición.
HFSS	<ul style="list-style-type: none"> • Software especializado en resolver problemas de tipo electromagnético, especialmente guías de onda y antenas. • Permite la integración de problemas electromagnéticos y 	<ul style="list-style-type: none"> • La Universidad Industrial de Santander no cuenta con la licencia por lo que se hace necesaria su adquisición. • La integración de problemas multifísicos es compleja y no

	térmicos en la misma simulación.	presenta suficiente documentación que facilite el entendimiento sobre el software.
FEKO	<ul style="list-style-type: none"> • Software especializado en la solución de problemas electromagnéticos en alta frecuencia. • Integra diferentes métodos de solución como elementos finitos o el método de los momentos. • Posee licencias estudiantiles gratuitas lo que permite su adquisición y utilización sin necesidad de comprar el software. 	<ul style="list-style-type: none"> • No permite integrar problemas electromagnéticos y térmicos. • Para resolver problemas multifísicos se hace necesario la utilización de software externo.

El software utilizado para realizar las simulaciones fue CST Studio Suite, ya que está enfocado a estudiar la interacción de ondas electromagnéticas con materiales y cuenta con las herramientas necesarias para abordar el problema propuesto. Por otro lado, la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander cuenta con la licencia del software por lo cual no se hace necesaria la adquisición de la misma.

4. ESTRUCTURA IMPLEMENTADA

Se estableció una estructura para analizar el calentamiento de un sólido parcialmente dopado con un material ferromagnético ubicada en su interior.

La estructura es una unión T plano E de dos guías de onda rectangulares con paredes de cobre, utilizadas para confinar los materiales y delimitar el sistema. En su interior se encuentra una estructura sólida que ha sido dopada con un material ferromagnético con propiedades conocidas, el cual después de ser agregada la sustancia esta se estratifica produciendo una variación de concentración del mismo en la estructura. Este material va a ser irradiado a través del brazo auxiliar de los arreglos T de guías de onda con campos electromagnéticos a una frecuencia de 2,45 [GHz] y 0,930 [GHz] una potencia de 1000 [W]. Las dimensiones utilizadas para la guía de onda fueron estándares conforme a la Electronic Industry Association donde la sección transversal tiene un ancho es de 86.36 [mm] y altura de 43.18 [mm].

Debido a que solo se desea calentar este material, se han colocado placas de cuarzo con baja conductividad térmica para evitar la transferencia de calor fuera la estructura de interés, adicionalmente para disipar las ondas electromagnéticas que no son absorbidas, fueron colocadas dos arreglos de un material dopado con una sustancia ferromagnética la cual opera con la finalidad de absorber las ondas restantes.

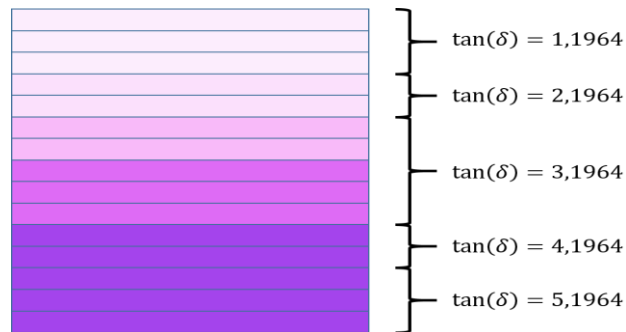
Para simular la estratificación del material ferromagnético se dividió la estructura a calentar 15 capas iguales de un grosor de 2,87 [mm] por capa, donde se fueron reduciendo en función de la altura los valores de tangente delta magnético, tomando como base las propiedades indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del material ferromagnético utilizado.

μ'	μ''	$\tan(\delta)$	Conductividad Térmica [W/K/m]	Capacidad de calor [kJ/K/kg]	Densidad [kg/m ³]
1,22449	6,36296	5,19641	386.46	0.95	3200

La disposición del material utilizado sobre la muestra se muestra en la figura 1.

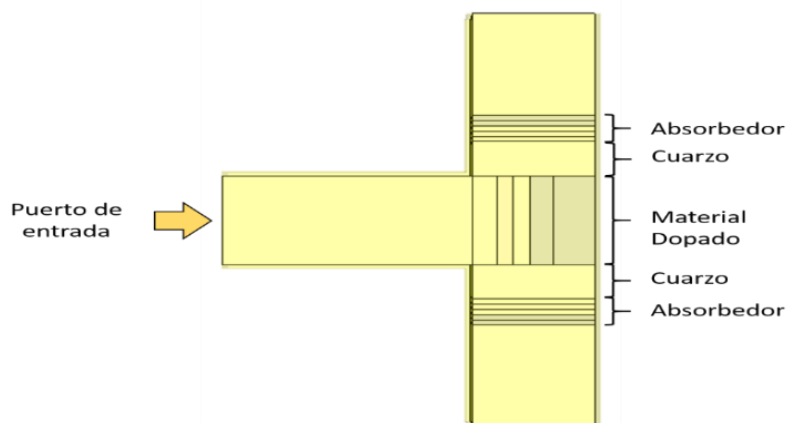
Figura 1. Estratificación del material ferromagnético.



Para los absorbedores fue utilizado la misma estructura dopada con material ferromagnético pero de forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda electromagnética incidente.

La disposición final de los materiales en la estructura propuesta para una configuración T rectangular se muestra en la figura 2.

Figura 2. Configuración T rectangular implementada.



Las variables utilizadas en el presente documento se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Variables.

Variable	Descripción
K	Temperatura en Kelvin
C	Calor específico [kJ/K/kg]
λ	Conductividad térmica [W/K/m]
ρ	Densidad volumétrica [kg/m ³]
H	Intensidad de campo magnético [A/m]
μ'	Parte real de la permeabilidad magnética
μ''	Parte imaginaria de la permeabilidad magnética
$\tan(\delta)$	Tangente de pérdidas magnéticas
W	Potencia RMS en
a	Espesor del cuarzo [mm]
b	Espesor total del absorbedor electromagnético [mm]

4.1 OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

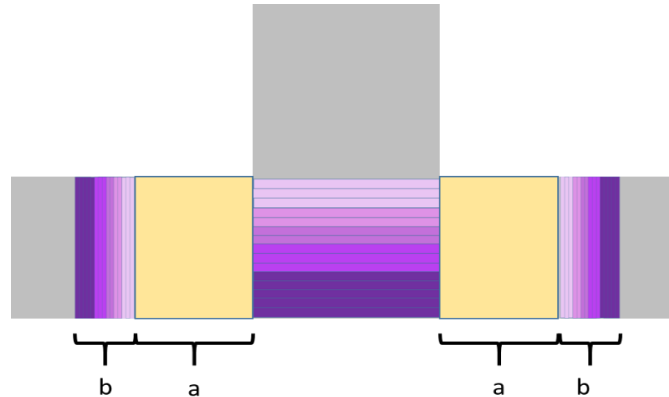
Como el objetivo es calentar solo la muestra que se encuentra en la intersección del brazo principal y el brazo auxiliar, además de atenuar la onda electromagnética aplicada con los absorbedores laterales, es necesario optimizar las dimensiones de las estructuras para garantizar el cumplimiento de estos parámetros.

Para este proceso de optimización fueron usados dos de los métodos disponibles en CST Studio, región de confianza y el método clásico de Powell, los cuales pueden ser consultados en el manual de usuario del software. Estos fueron seleccionados debido a la velocidad de proceso y al carácter no estocástico de sus modelos, debido a que el problema a tratar es complejo y con métodos estocásticos el costo computacional es elevado.

4.1.1 Parametrización de los modelos. Como la estructura de las guías de onda utilizadas es fija al igual que el tamaño de la muestra con el material ferromagnético, solo es posible variar las dimensiones de los absorbedores

electromagnéticos y de la placa aislante de cuarzo. Por tanto su espesor fue definido como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Parametrización del modelo.



En donde **a** corresponde al espesor de las placas de cuarzo y **b** al de los absorbedores electromagnéticos.

Estos parámetros fueron optimizados en función de los siguientes criterios.

- Minimizar las pérdidas en el cobre.
- Maximizar la energía absorbida por el material ferromagnético.
- Maximizar la energía absorbida por los absorbedores electromagnéticos.
- Maximizar la potencia absorbida en la guía de onda para una frecuencia de 2,45 [GHz] y 930 [MHz].

En la tabla 3 se describen los valores de **a** y **b** óptimos obtenidos a partir del proceso de optimización con las condiciones expuestas anteriormente.

Tabla 4. Parámetros óptimos.

	F=2.45 [GHz]	F=930 [MHz]
a	16,532 [mm]	45.2155 [mm]
b	13,926 [mm]	35.2554 [mm]

5. SIMULACIONES DE CONFIGURACION T RECTANGULAR

En la tabla 5, se presenta la metodología utilizada al realizar las simulaciones.

Tabla 5. Metodología utilizada en el desarrollo del problema.

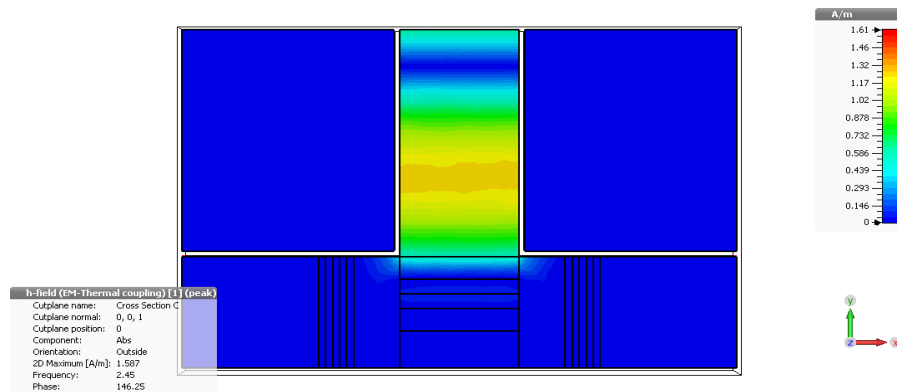
SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN
Efecto de aislante térmico	Para ciertas aplicaciones es necesario evitar la propagación de temperatura fuera de la muestra, por tanto se simuló la estructura propuesta sin aislante térmico y con aislante térmico alrededor de la guía de onda.
Variación en la concentración del material ferromagnético	Se varió la concentración en la estructura, aumentando está en su región superior y central para calentar un punto de interés.
Unión T plano E asimétrica	Se simuló una configuración no simétrica para observar cómo se distribuye la potencia de la onda electromagnética y el perfil de temperatura en el sistema.
Reducción de potencia aplicada	Se simuló la estructura con solo el 1% de la potencia propuesta para observar el calentamiento a baja potencia.
Variación en la frecuencia de operación	Se utilizó una frecuencia de 930 [MHz] para observar el efecto de la frecuencia de la onda electromagnética en la distribución de temperatura. Para esta prueba se modificaron las dimensiones de la union T para permitir la propagación de las ondas electromagnéticas.
Tiempo de exposición	Se simuló la estructura final con tiempos de exposición a ondas electromagnéticas de 10, 30 y 60 segundos.

5.1 ESTRUCTURA SIN AISLANTE TERMICO

5.1.1 Simulación electromagnética. En la distribución de campo magnético presentada en la figura 4 se observa la rápida absorción del mismo por parte del material ferromagnético, lo que impide la transferencia de potencia no deseada a los absorbedores laterales. Debido a la división de potencia que presenta esta configuración en la intersección del brazo auxiliar con el principal, la energía que llega a la parte inferior de la estructura central donde se encuentra la mayor concentración de material ferromagnético es reducida, además, los valores de tangente delta en las regiones superiores son considerables, por lo que la absorción rápida de los campos electromagnéticos en esta área impide que la potencia llegue al inferior de la muestra.

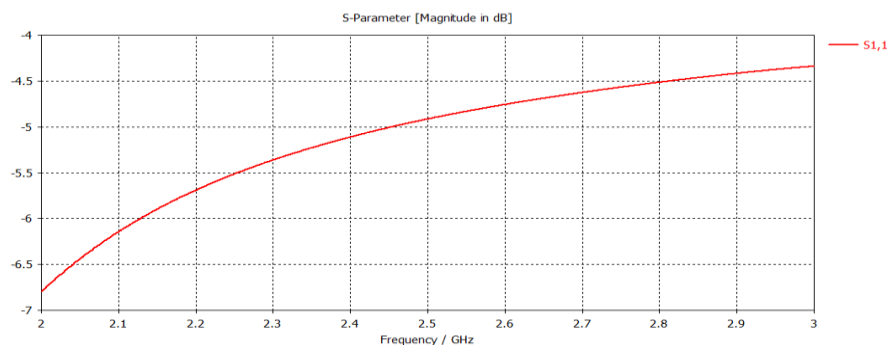
Debido a las características del material ferromagnético utilizado para dopar la estructura central y el diseño optimizado en la distribución de los materiales, la mayor parte de la energía de la onda electromagnética es absorbida antes de llegar a los absorbedores por lo que se transforma en su mayor parte en calor.

Figura 4. Distribución de campo magnético en el interior de configuración T rectangular.



El índice de refracción de la onda electromagnética incidente, se observa en los parametros S. En el puerto de entrada (1) de la configuración de T plano E el índice de refracción aumenta con respecto a la frecuencia de operación, para el caso simulado se encuentra en un rango de -5 dB lo cual es un valor aceptable, tal como se observa en la figura 5.

Figura 5. Parámetro S11 de la guía de onda.



Debido a la simetría del sistema simulado, los puertos dos (2) y tres (3) presentan el mismo comportamiento como se ve en la figura 6 y 7. El índice de refracción es mucho menor (-55 dB) ya que en estos puertos se encuentran localizados los absorbedores electromagnéticos.

Figura 6. Parámetro S21 de la guía de onda

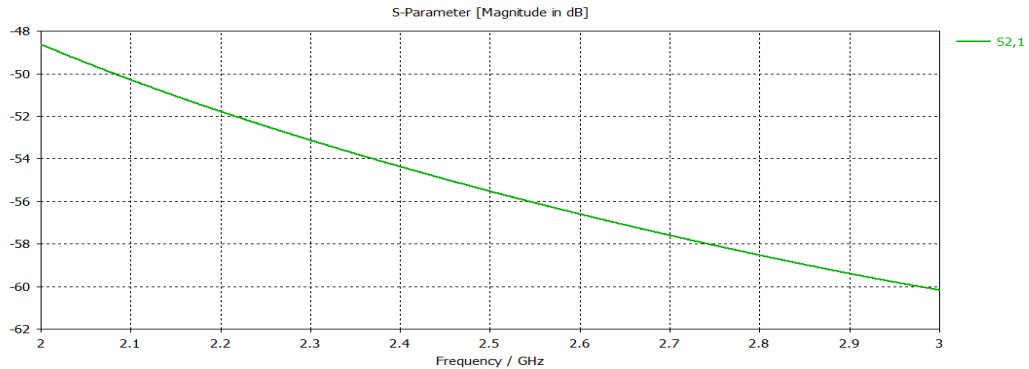
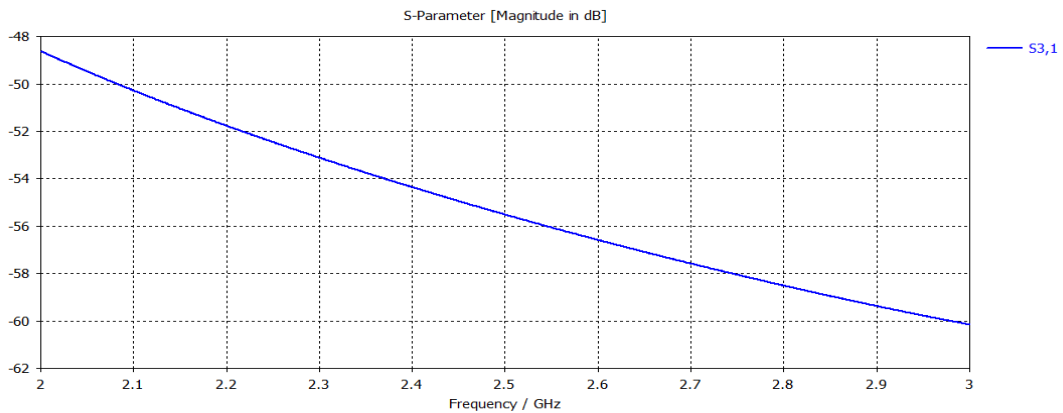
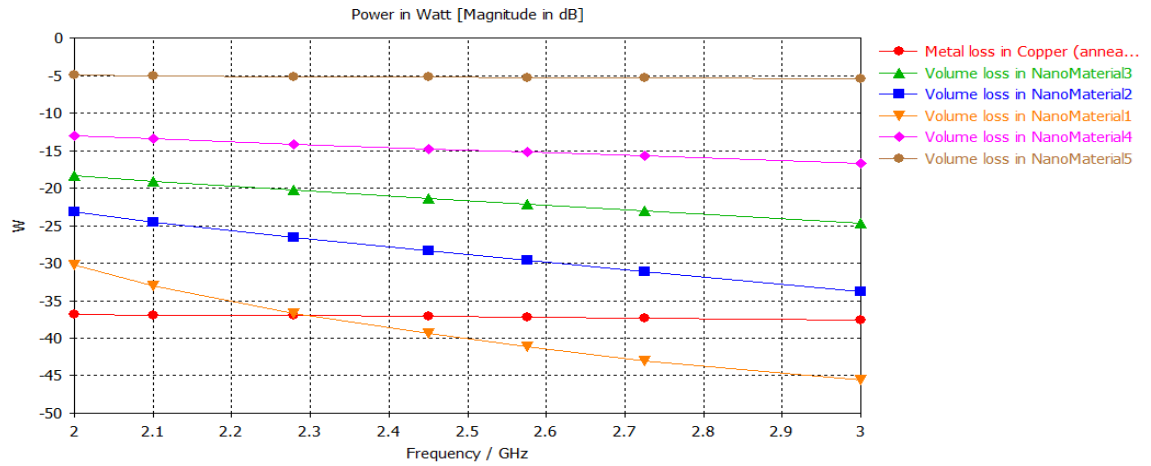


Figura 7. Parámetro S31 de la guía de onda



En la figura 8 se observa el consumo de potencia de los materiales que conforman el sistema. Los materiales ubicados más cercanos al área de incidencia de la onda electromagnética son los que absorben la mayor cantidad de energía.

Figura 8. Gráfico de consumo de potencia por material.



5.1.2 Simulación térmica. Lo anterior se ve reflejado en la distribución de temperatura en la estructura central correspondiente a la figura 9 y 10, donde se aprecia que esta aumenta significativamente en las regiones superiores y se reduce conforme se avanza hacia la parte inferior de la guía, contrario a lo esperado.

Figura 9. Perfil de temperaturas por capas de la muestra.

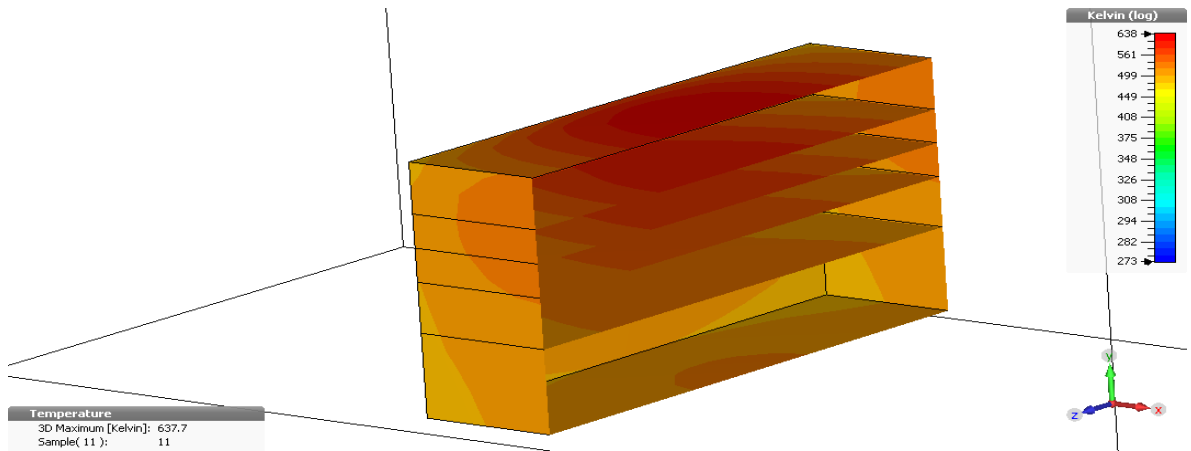
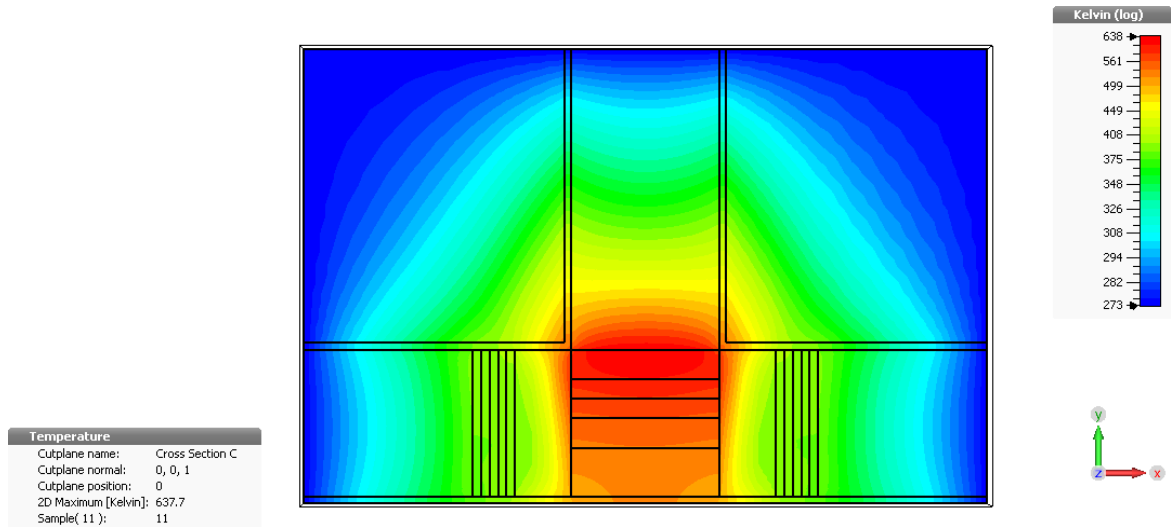
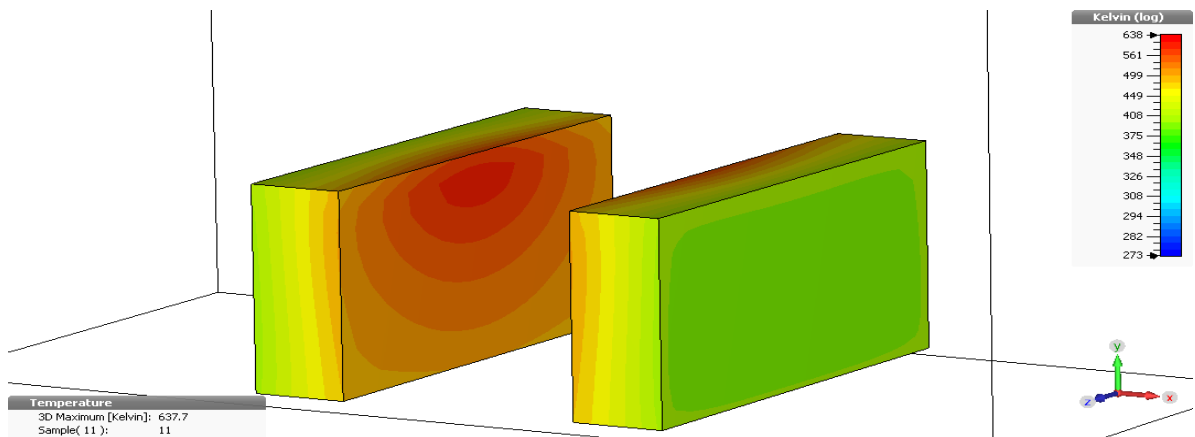


Figura 10. Perfil de temperatura de la guía de onda.



La temperatura máxima alcanzada por la estructura irradiada con ondas electromagnéticas por un tiempo de 60 [s] es de 637,7 K. El calor es transferido a las placas de cuarzo por conducción. En la figura 11 se observa la disposición de estas sobre la guía de onda con su respectivo perfil de temperatura.

Figura 11. Perfil de temperatura de las placas de cuarzo.



Las mayores temperaturas en las placas de cuarzo se concentran en las regiones superiores y que están en contacto directo con la muestra dopada con material ferromagnético debido a la conducción de temperatura.

En su región de contacto con el absorbedor electromagnético se observa un menor calentamiento debido a que el cuarzo no absorbe microondas y el calentamiento en este problema es transferido únicamente por conducción. En las figuras 12 y 13 se presenta este perfil de temperatura.

Figura 12. Perfil frontal de temperatura de la placa de cuarzo.

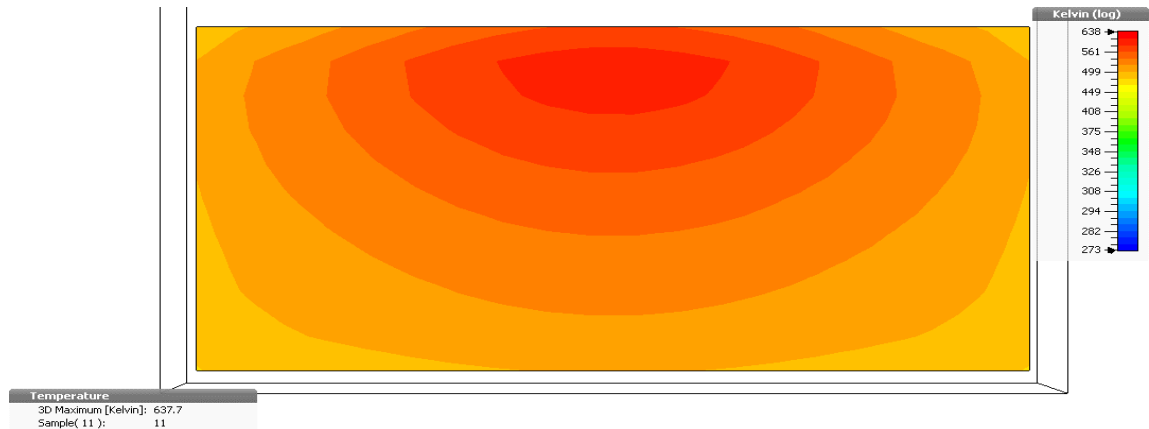


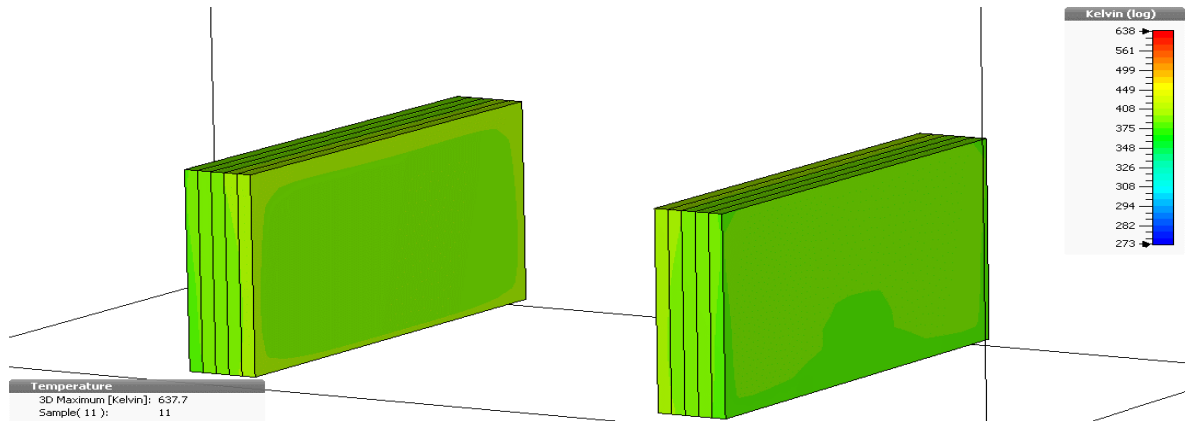
Figura 13. Perfil posterior de temperatura de la placa de cuarzo.



Adicionalmente se tiene el perfil de temperatura de los absorbedores electromagnéticos, el cual presenta dos comportamientos importantes, en la región que se encuentra en contacto con la placa de cuarzo, la distribución de temperatura mantiene el mismo patrón debido a que la principal fuente de

temperatura en este caso es la conducción, pero en su región posterior presenta un perfil próximo al producido por ondas electromagnéticas. En la figura 14 se muestra la disposición de los absorbedores sobre la guía de onda y su respectivo perfil de temperatura.

Figura 14. Absorbedores electromagnéticos y su perfil de temperaturas.



La temperatura en los absorbedores no se incrementa de forma significativa, ya que la mayor parte de las pérdidas se encuentran localizadas en la superficie de la estructura central. En la figura 15 se observa el perfil de temperatura frontal de un absorbedor y en la figura 16 el posterior.

Figura 15. Perfil de temperatura frontal de los absorbedores electromagnéticos.

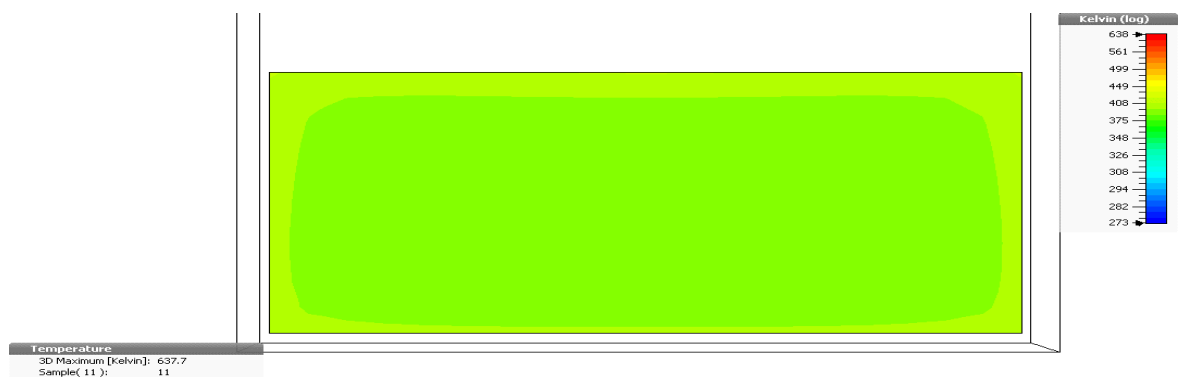
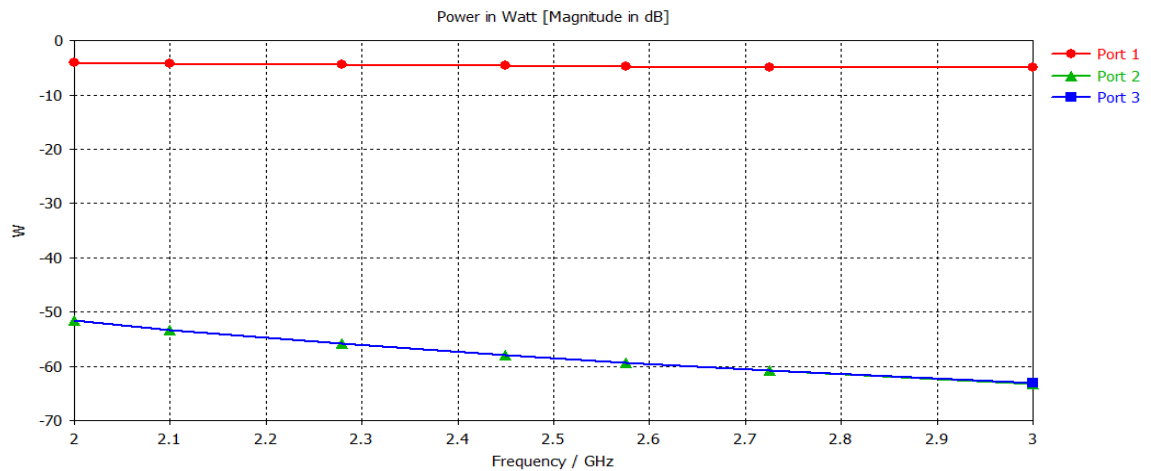


Figura 16. Perfil de temperatura posterior de los absorbentes electromagnéticos.



La potencia de la onda electromagnética se divide en partes iguales hacia los puertos 2 y 3 de la guía como se muestra en la figura 17. Por tanto, solo es necesario analizar una de las placas de cuarzo y uno de los absorbentes electromagnéticos ya que su respuesta es simétrica.

Figura 17. Potencia medida en los puertos de la configuración T plano E.



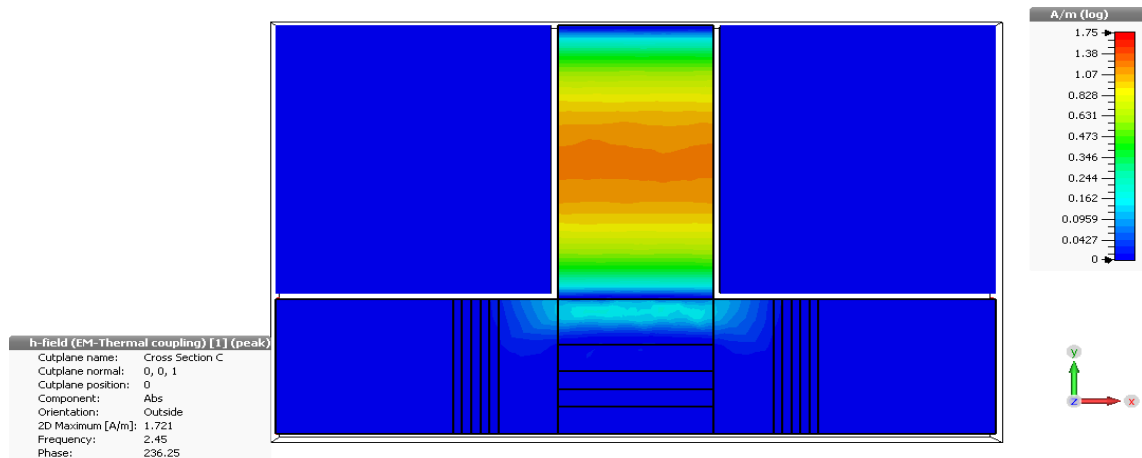
Para analizar cómo afecta la repartición de dopado en su distribución de temperatura, se invirtieron los valores utilizados, dejando así en la parte superior de la muestra la mayor concentración del material ferromagnético y en su parte

inferior la menor concentración del mismo. La distribución de campo magnético se observa en la figura 18.

5.1.3 Estructura con mayor concentración en la parte superior de la muestra.

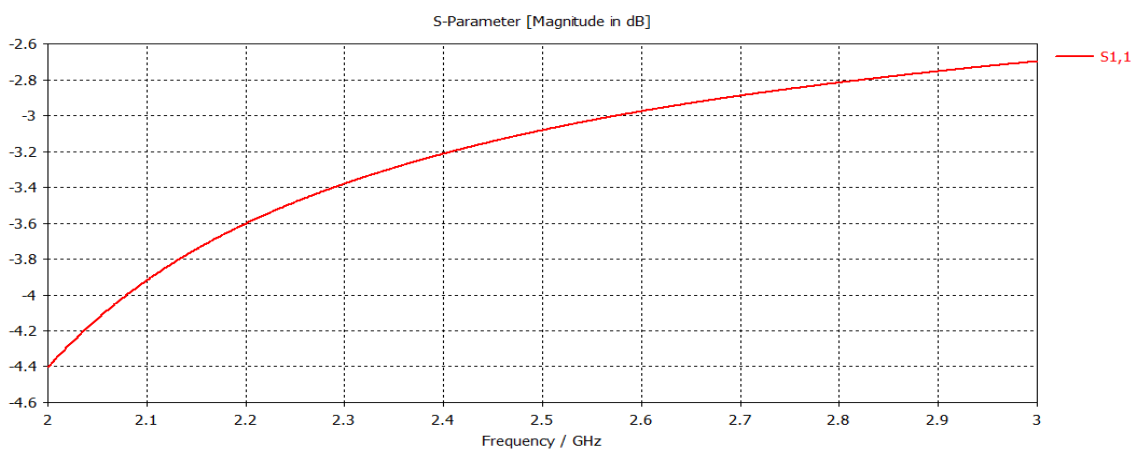
5.1.3.1 Simulación electromagnética.

Figura 18. Distribución de campo magnético en la guía de onda.



El índice de refracción aumenta para el puerto uno (1) de la guía de onda el cual para una frecuencia de 2.45 [GHz] alcanza un valor de -3,15 [dB] como se muestra en la figura 19. Esta variación se debe al cambio en la distribución del dopado.

Figura 19. Parámetro S11



Como la guía conserva su simetría, los parámetros S21 y S31 son iguales. Los valores de estos con respecto a la simulación anterior fueron mayores. Los resultados obtenidos se aprecian en la figura 20 y 21.

Figura 20. Parámetro S21

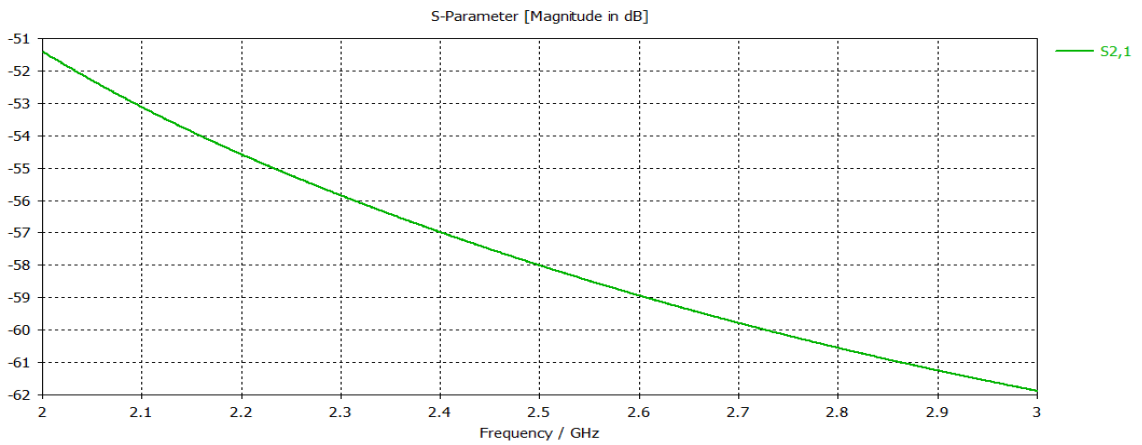
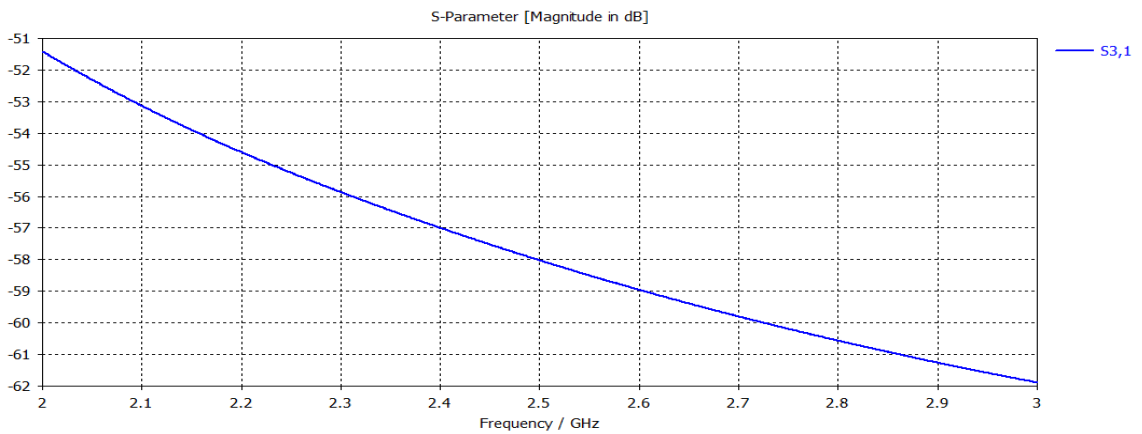
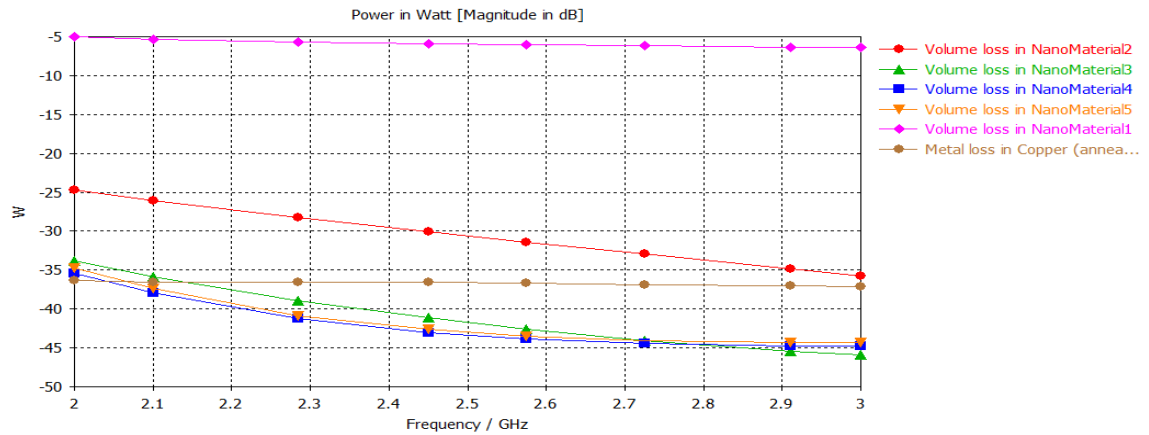


Figura 21. Parámetro S31



Debido al aumento de la concentración del material ferromagnético en la parte superior, se observa una mayor absorción de la onda electromagnética incidente en esta área, lo cual impide que alcance las regiones inferiores de la muestra, por lo tanto, la mayor parte de las pérdidas están concentradas en la superficie como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Potencia consumida por las capas de material dopado.



A pesar de que la mayor parte de la onda es consumida en el área de interés, es absorbida principalmente en su superficie y no penetra sustancialmente en el material, por tanto, el proceso de calentamiento no es uniforme.

5.1.3.2 Simulación térmica. En la figura 23 y 24 se presenta la distribución de temperatura obtenida para estas condiciones de simulación:

Figura 23. Distribución de temperatura en la guía de onda.

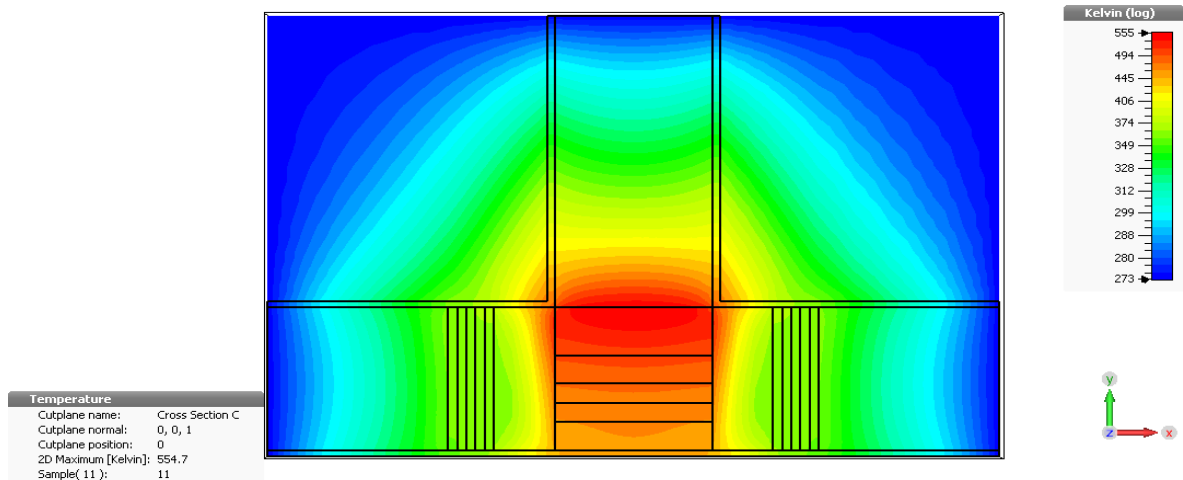
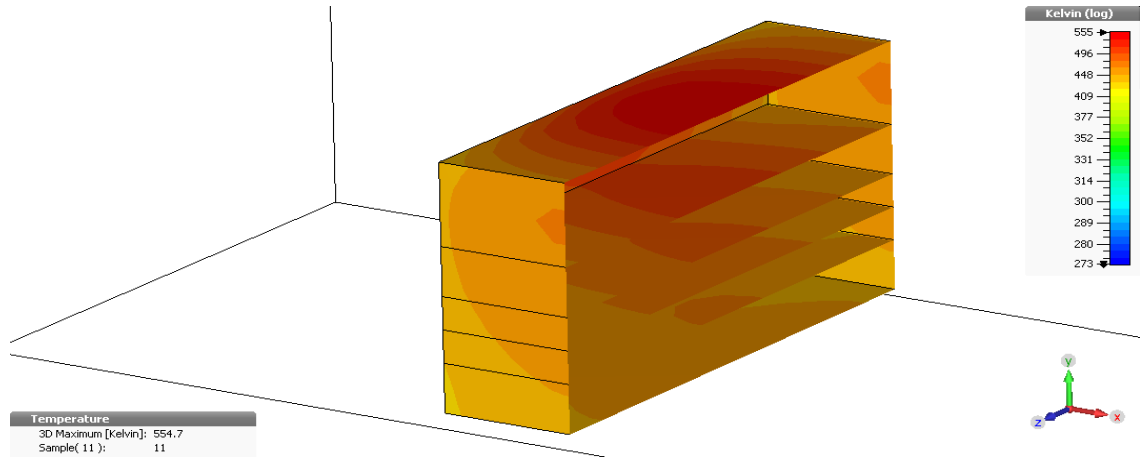


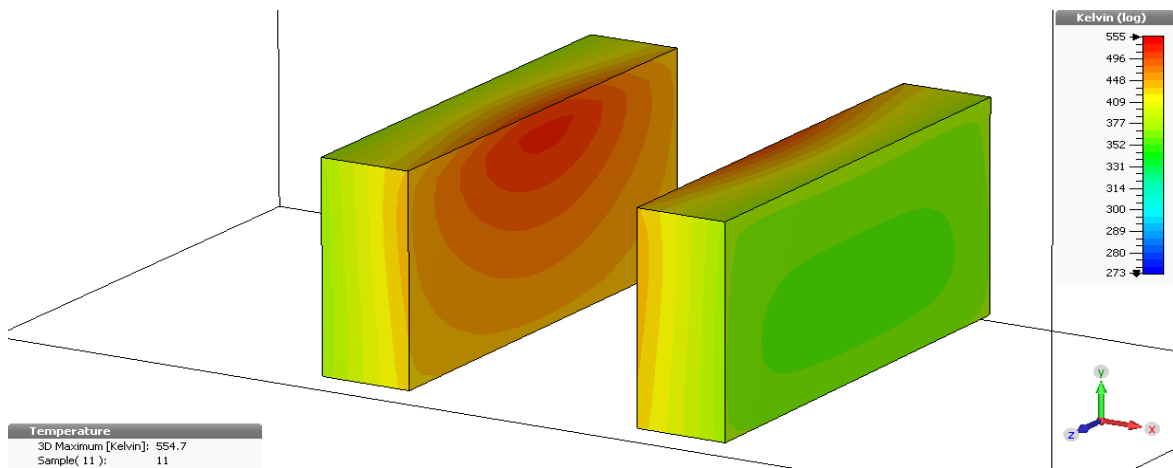
Figura 24. Perfil de temperatura por capas.



Las áreas de máxima temperatura se concentran en la parte superior de la muestra, con una uniformidad menor que el caso anterior. A pesar que las pérdidas se encuentran limitadas a esta área el aumento de temperatura fue menor, esto se debe a que el calor generado por las ondas electromagnéticas se distribuye por la muestra por conducción térmica.

Las placas de cuarzo implementadas presentan un comportamiento similar al caso anterior (figura 25), con valores menores de temperatura debido a la menor absorción del material dopado.

Figura 25. Perfiles de temperatura en el cuarzo.



En la figura 26 y 27 se presenta la distribución de temperatura en la parte frontal y posterior de las placas de cuarzo.

Figura 26. Perfil frontal de temperatura en la placa de cuarzo.

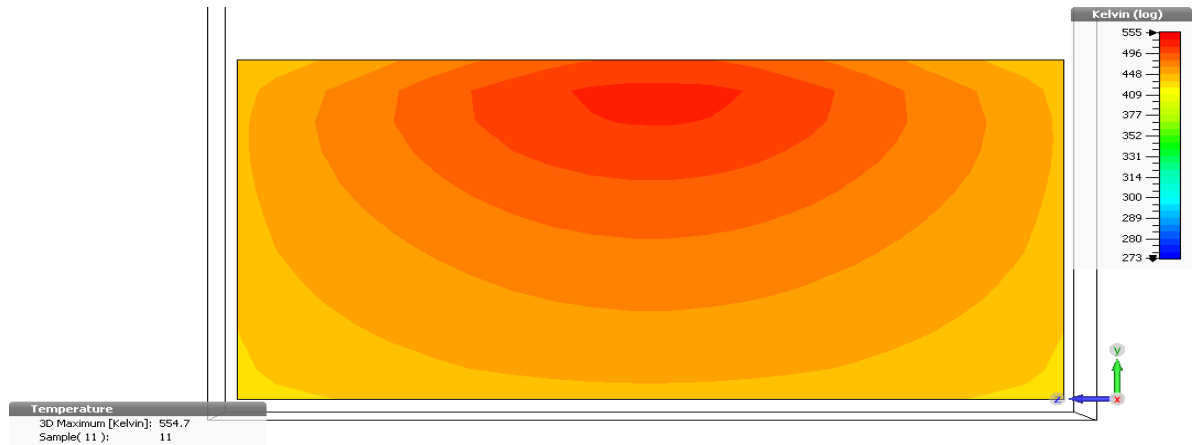
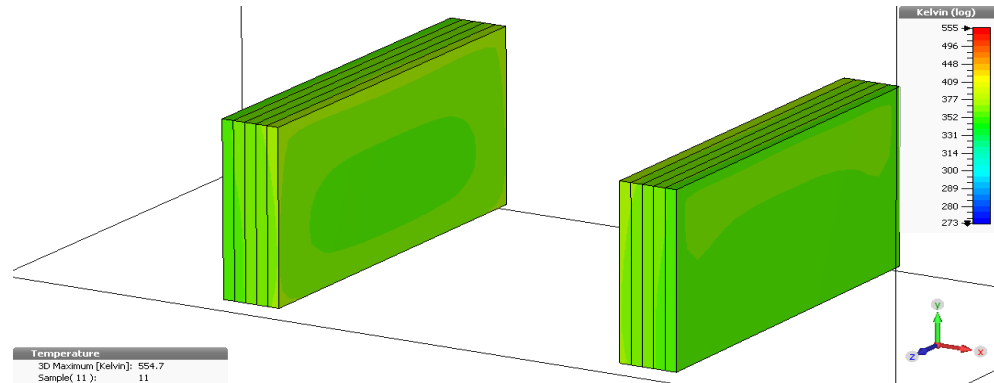


Figura 27. Perfil posterior de temperatura en la placa de cuarzo.



El cuarzo no conduce eficientemente la energía térmica, por esta razón la temperatura en los absorbedores electromagnéticos es baja en comparación con la región frontal de las placas de cuarzo. En la figura 28 se muestra la distribución de temperatura en los absorbedores electromagnéticos.

Figura 28. Perfiles de temperatura en los absorbentes electromagnéticos.



Los perfiles de temperatura obtenidos para los absorbentes electromagnéticos se observan en la figura 29 y 30.

Figura 29. Perfil de temperatura frontal de un absorbedor

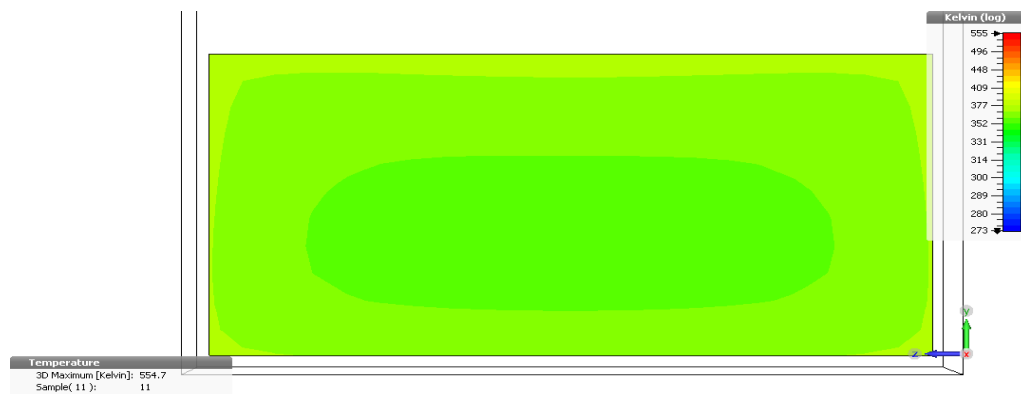
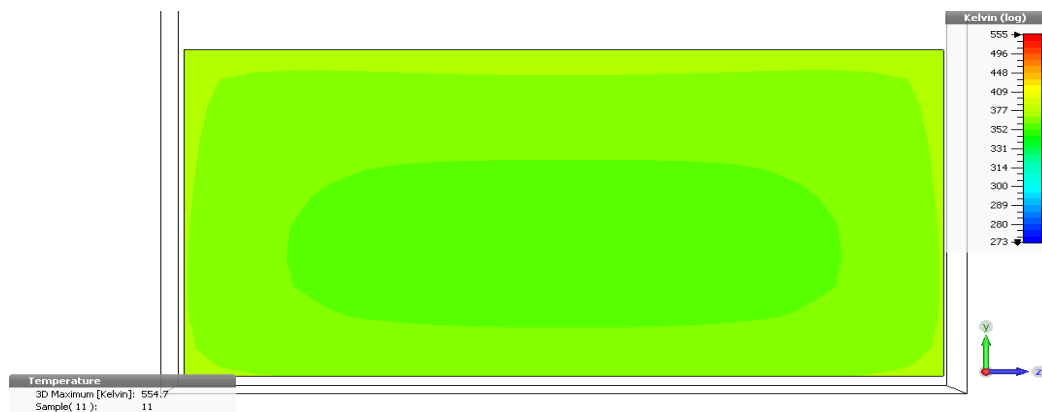
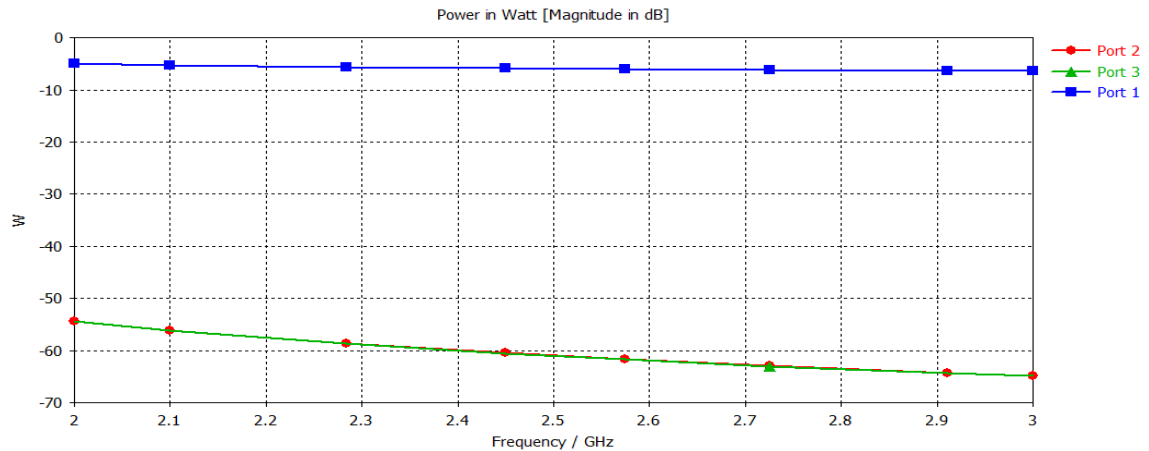


Figura 30. Perfil de temperatura posterior del absorbedor electromagnético.



Invirtiendo la repartición del dopado con material ferromagnético, se sigue conservando la simetría en la estructura T plano E, por tanto la distribución de potencia hacia los puertos 2 y 3 de la guía de onda es igual, tal como se observa en la figura 31.

Figura 31. Potencia en los puertos de la configuración T plano E.

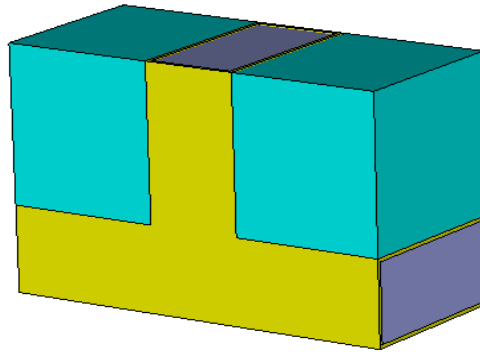


5.2 DISTRIBUCIÓN DEL DOPADO CON AISLANTE TERMICO

Analizando las distribuciones de temperatura obtenidas, gran parte de la energía térmica es consumida por el medio que rodea la configuración T plano E, lo cual, en algunas aplicaciones no es favorable por características del medio. Para resolver este problema se propone utilizar un aislante térmico que cubra el sistema y evite la transferencia de calor al medio.

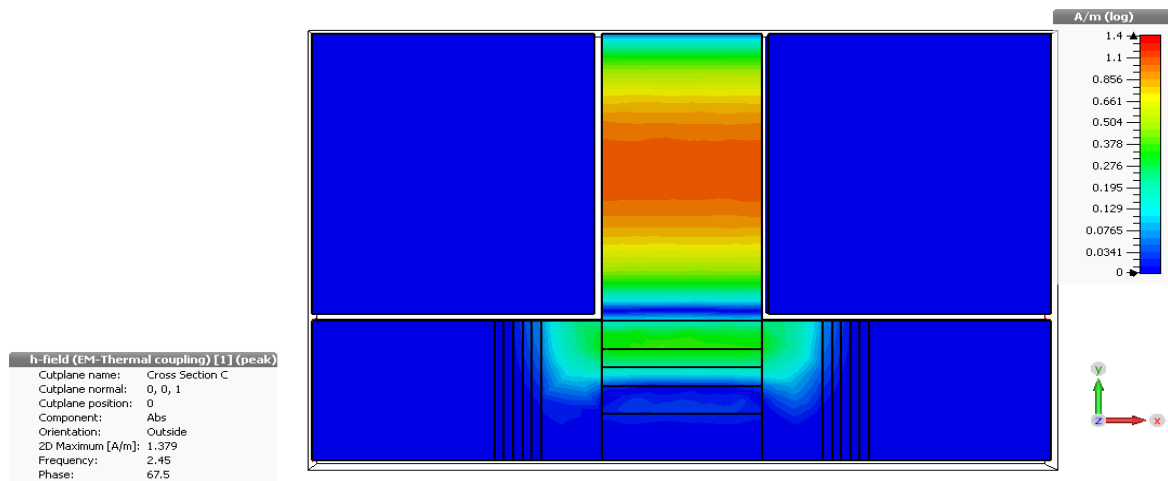
Para simular este material se utilizaron fronteras adiabáticas en los límites del sistema y un material aislante donde no es posible establecer estas fronteras debido a las condiciones del simulador. El modelo propuesto se observa en la figura 32.

Figura 32. Modelo con aislante térmico.



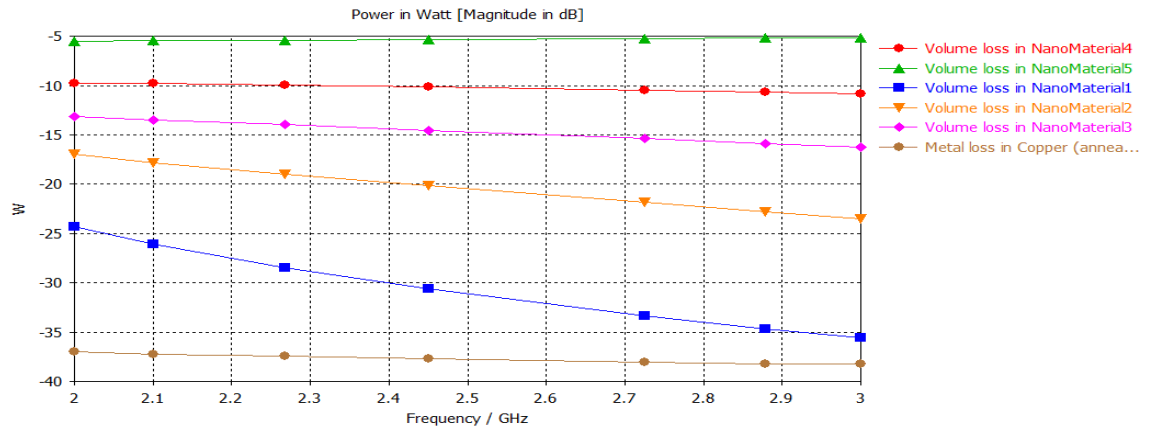
5.2.1 Simulación electromagnética. Para la distribución normal del dopado en donde este se estratifica por gravedad hacia la parte inferior se obtuvo aumento la absorción de potencia en los materiales más próximos a la región superior de la muestra ya que la energía no se dispersa y concentra en el área de interés como se muestra en la figura 33.

Figura 33. Distribución de campo magnético.



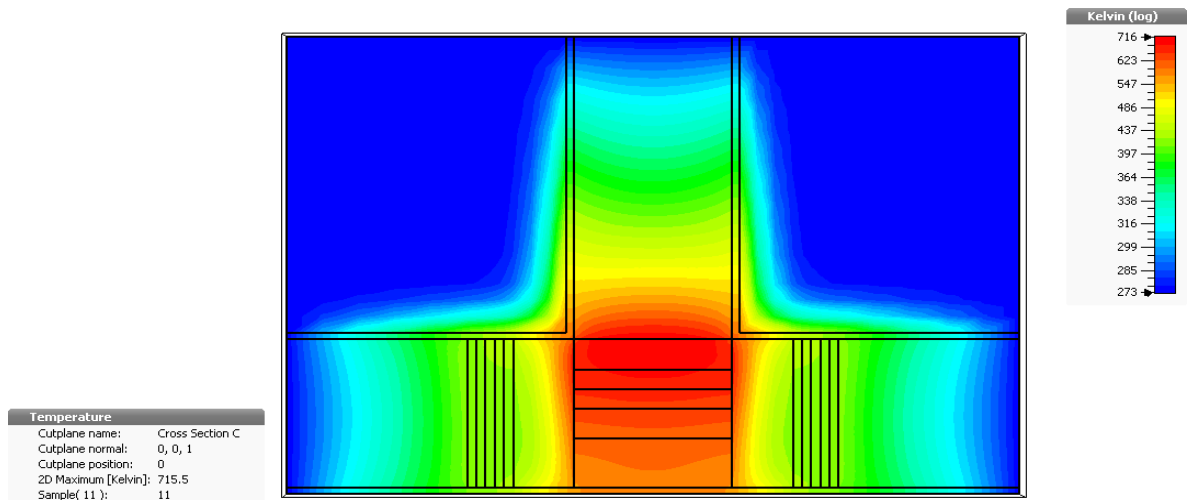
Adicionalmente se tiene los valores de potencia absorbida por los materiales en la figura 34, lo cual permite comprobar el comportamiento observado en la distribución de campo magnético.

Figura 34. Potencia absorbida en las capas de material ferromagnético.



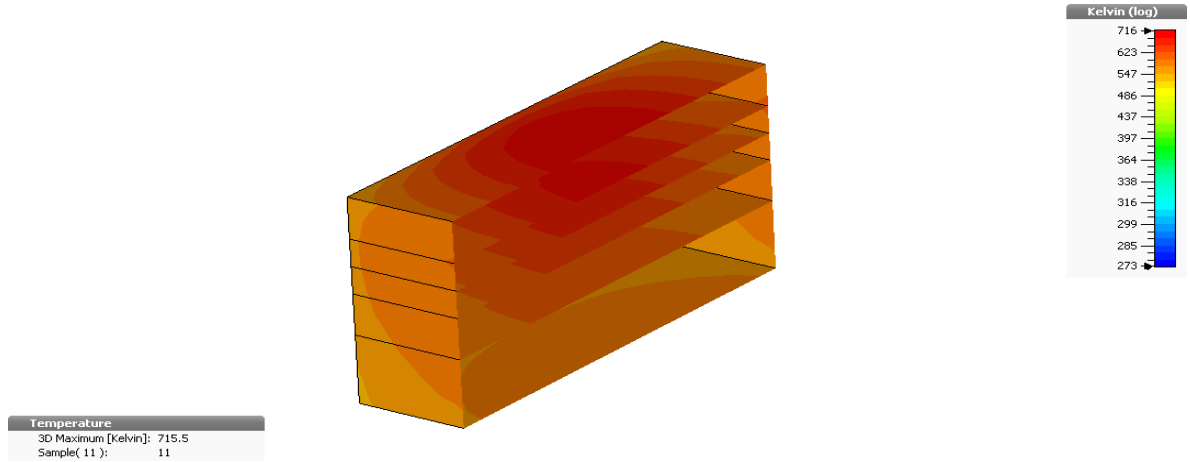
5.2.2 Simulación termica. Utilizando el aislante térmico se evita que se disperse la temperatura a través del medio circundante, por tanto esta se concentra en el interior de la guía elevando la temperatura y limitando de forma más eficiente el sistema, como se observa en la figura 35.

Figura 35. Distribución de temperatura.



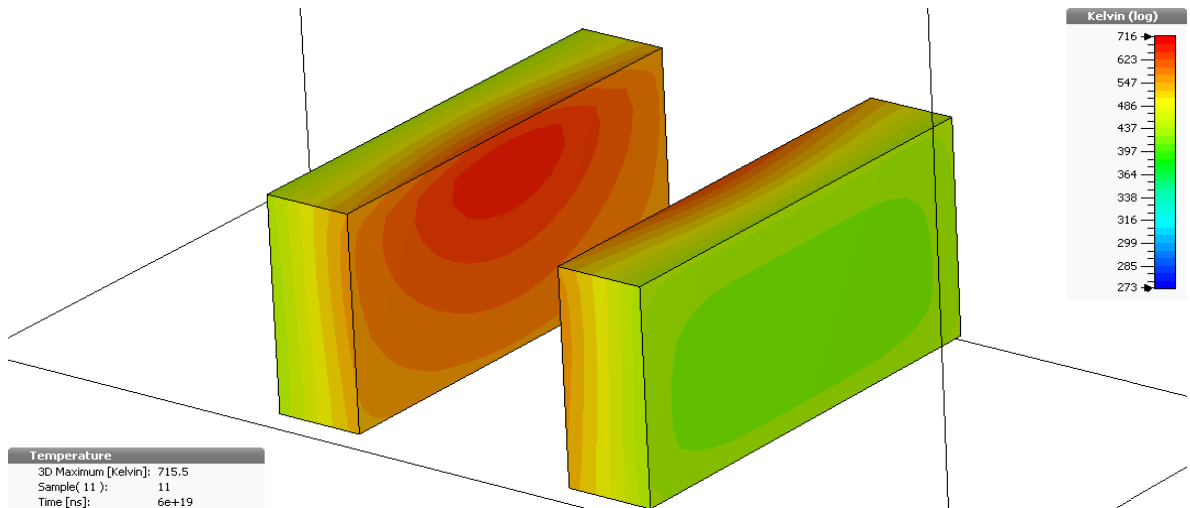
El máximo de temperatura se concentra en la región central de la muestra y va disminuyendo conforme se avanza hacia la parte inferior de la misma tal como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Perfil de temperatura por capas en la muestra.



Al tener una mayor temperatura en la muestra, permite transferir por conducción mayor temperatura a las placas de cuarzo, la cual es cual se concentra en la región superior correspondiendo al máximo de la muestra como se muestra en la figura 37.

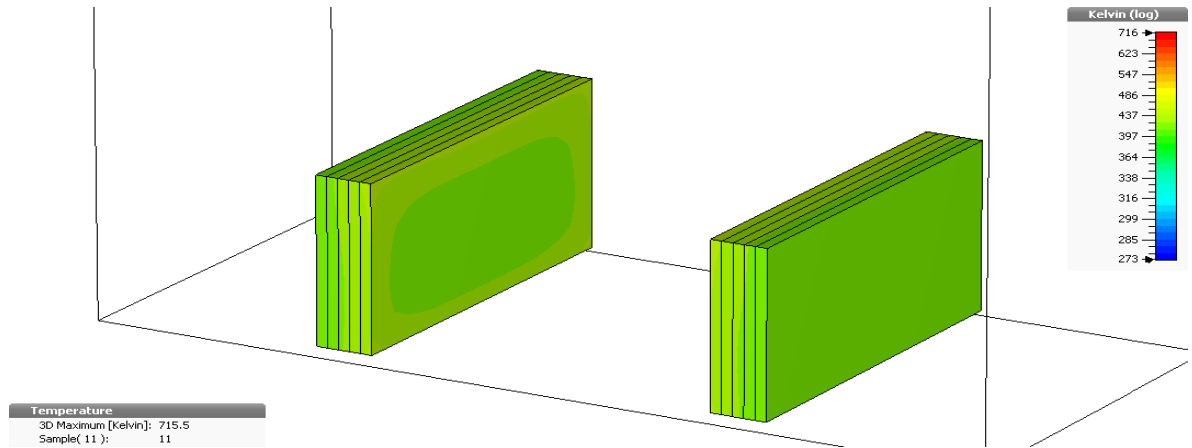
Figura 37. Perfil de temperatura en las placas de cuarzo.



A pesar que la temperatura en el sistema aumento, la transferencia de calor a los absorbedores electromagnéticos permanece en el mismo rango, esto se debe a que el cuarzo no es buen conductor de la temperatura por lo que aísla de manera

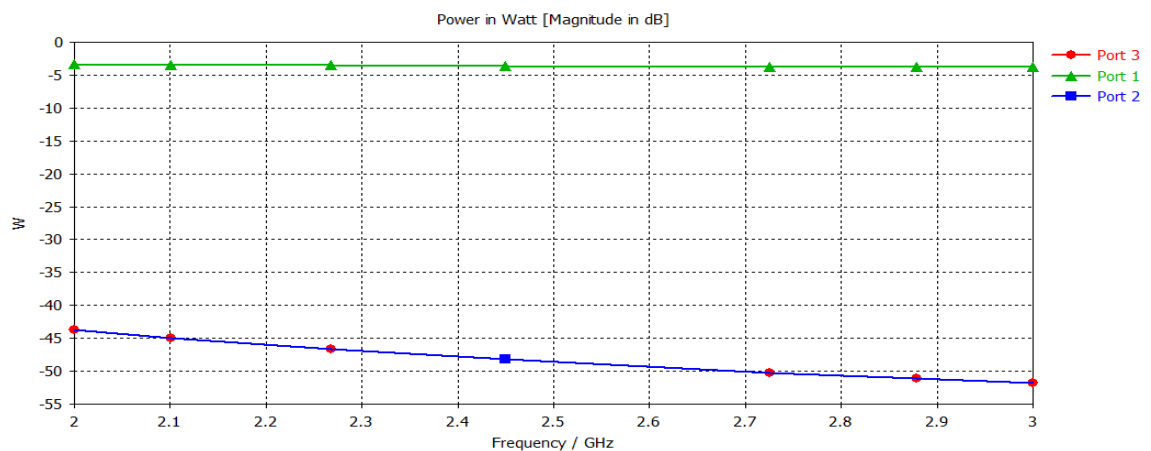
eficientemente el sistema. La distribución de temperatura en los absorbedores se muestra en la figura 38.

Figura 38. Perfil de temperatura en los absorbedores electromagnéticos.



La implementación del material aislante no afecta la distribución de potencia dentro de la configuración T plano E, como se observa en la figura 39 donde la potencia en el puerto 2 y 3 sigue siendo simétrica.

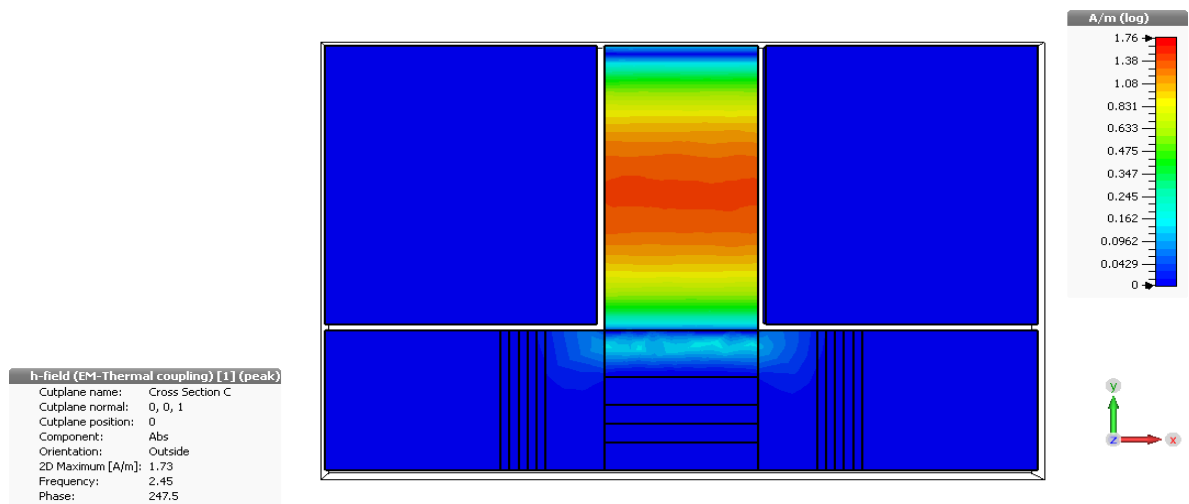
Figura 39. Potencia en los puertos.



5.2.3 Estructura con dopado concentrado en la región superior de la muestra. Se simulo de igual forma el material dopado de forma inversa como en el caso sin aislante para contrastar los resultados.

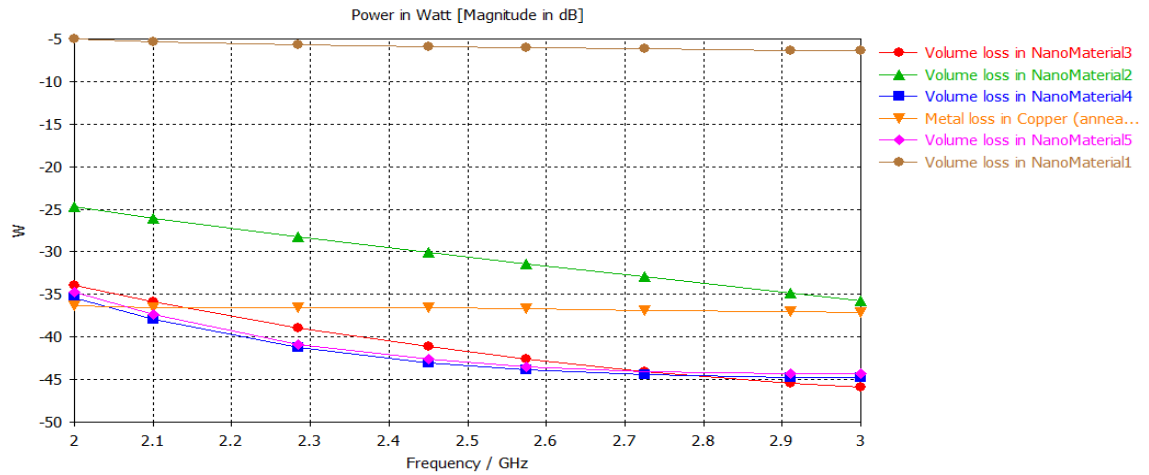
5.2.3.1 Simulación electromagnética. Al igual que en el caso sin aislante, el campo magnético es absorbido principalmente por las capas superiores de mayor concentración, limitando la penetración de la onda electromagnética dentro de la muestra de interés tal como se observa en la figura 40.

Figura 40. Distribución de campo magnético con dopado invertido.



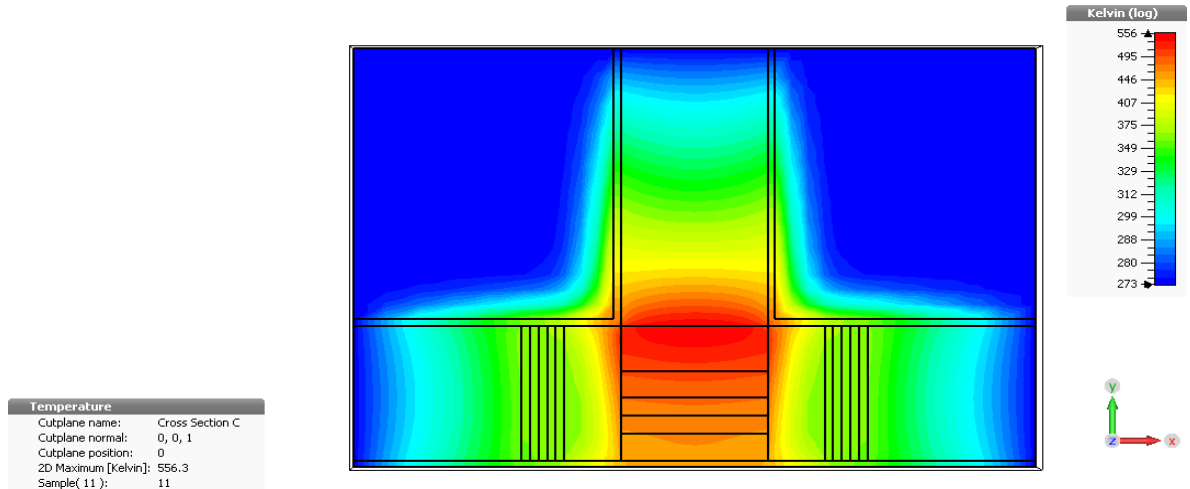
Prácticamente la potencia es absorbida por las primeras capas de material a diferencia del caso anterior donde se consume de manera progresiva. Los valores de potencia absorbida se indican en la figura 41.

Figura 41. Potencia absorbida por las capas de material ferromagnético.



5.2.3.2 Simulación termica. A pesar que la temperatura disipada que se transfiere al medio es menor por el efecto del aislante térmico, el calentamiento del sistema no presenta una diferencia sustancial con el caso sin aislante, como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Distribución de temperatura en el sistema.



De igual manera ocurre con la muestra de interés y las placas de cuarzo, las cuales presentan una distribución de temperatura muy cercana a la simulación sin

aislante. Los valores de temperatura para la muestra y las placas de cuarzo se muestran en las figuras 43 y 44 respectivamente.

Figura 43. Distribución de temperatura en la muestra de interés.

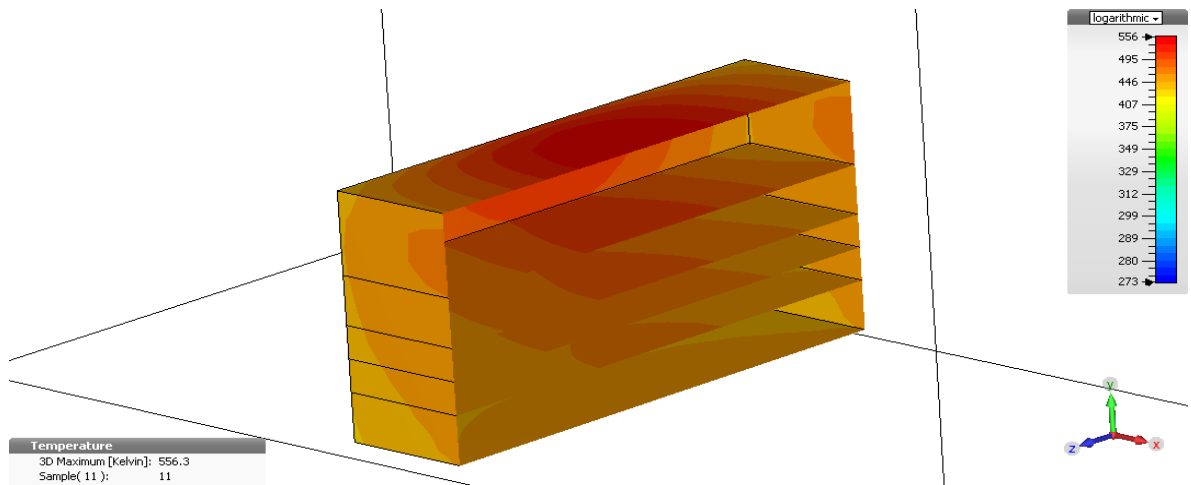
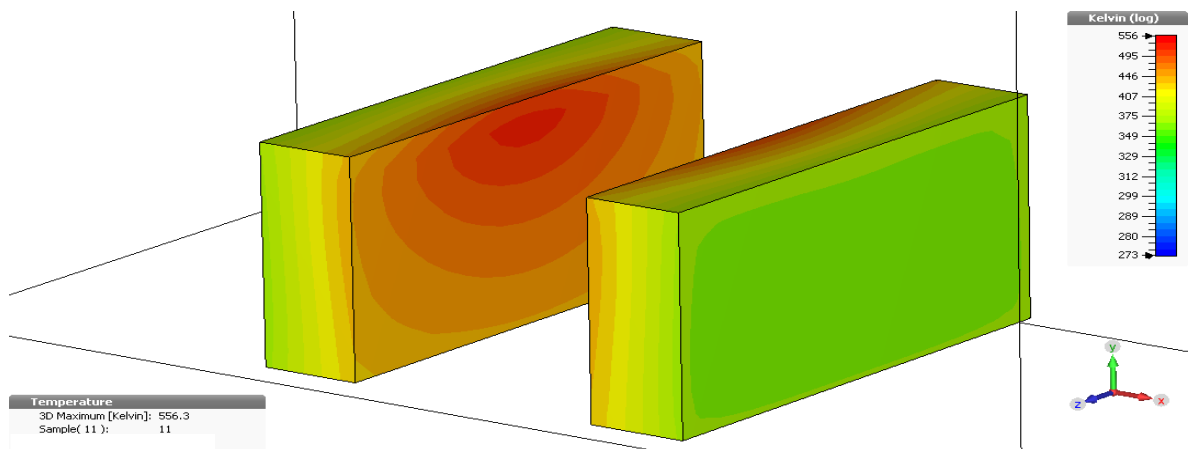
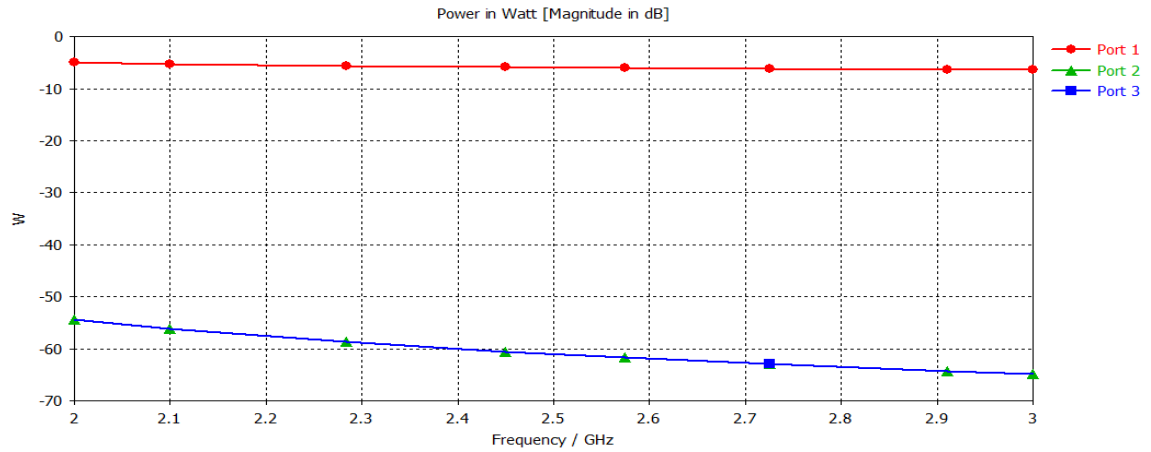


Figura 44. Distribución de temperatura en las placas de cuarzo.



Debido a la simetría en la configuración T plano E que se ha simulado, la división de potencia realizada es simétrica como se observa en la figura 45.

Figura 45. División de potencia en la configuración T plano E.

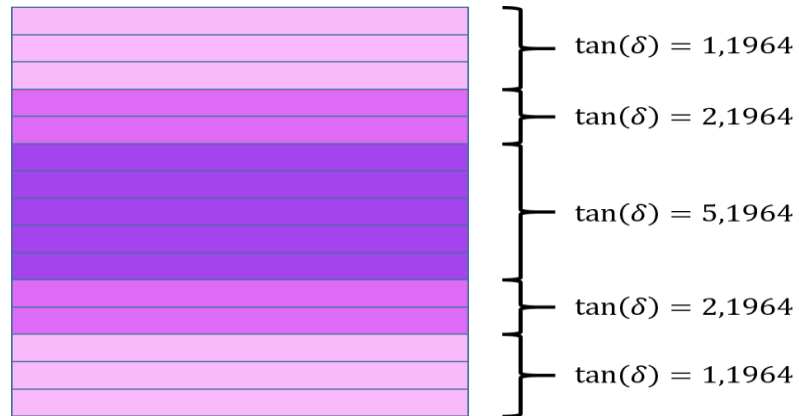


5.3 VARIACION EN LA CONCENTRACION DEL MATERIAL FERROMAGNÉTICO.

Ubicar de forma adecuada las áreas de mayor concentración de material ferromagnético permite aplicar las ondas electromagnéticas de forma eficiente para calentar regiones o puntos de interés. Para simular el efecto que tiene la concentración del material en el aumento de temperatura se simuló las siguientes estructuras:

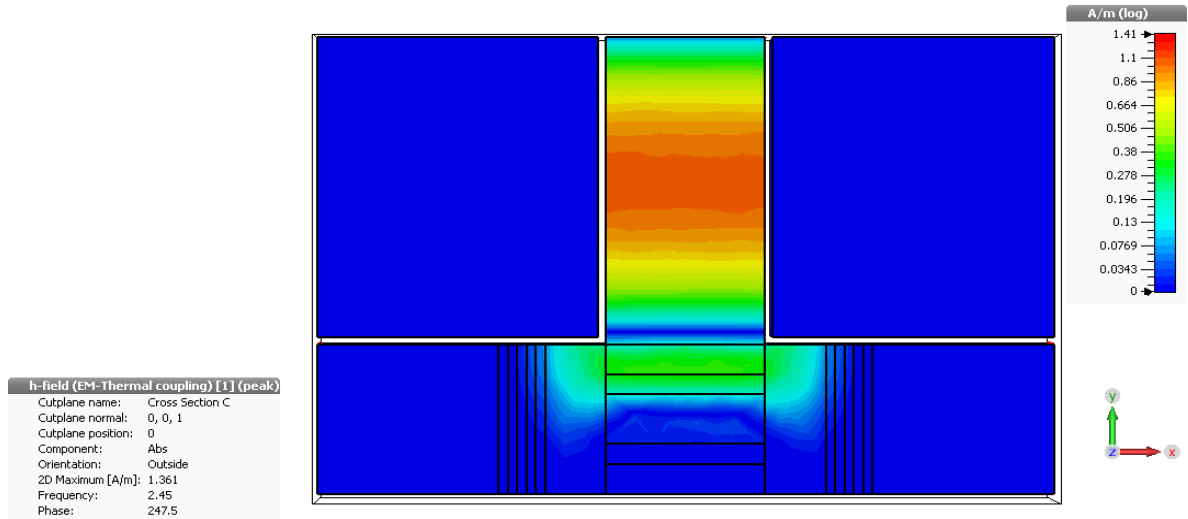
5.3.1 Dopado concentrado en el centro de la muestra. Se ubicó el material con mayor absorción que representa la mayor concentración en el área central y a medida que se aleja del centro disminuye el valor de la tangente delta magnética como se muestra en la figura 46.

Figura 46. Distribución del material ferromagnético en la muestra



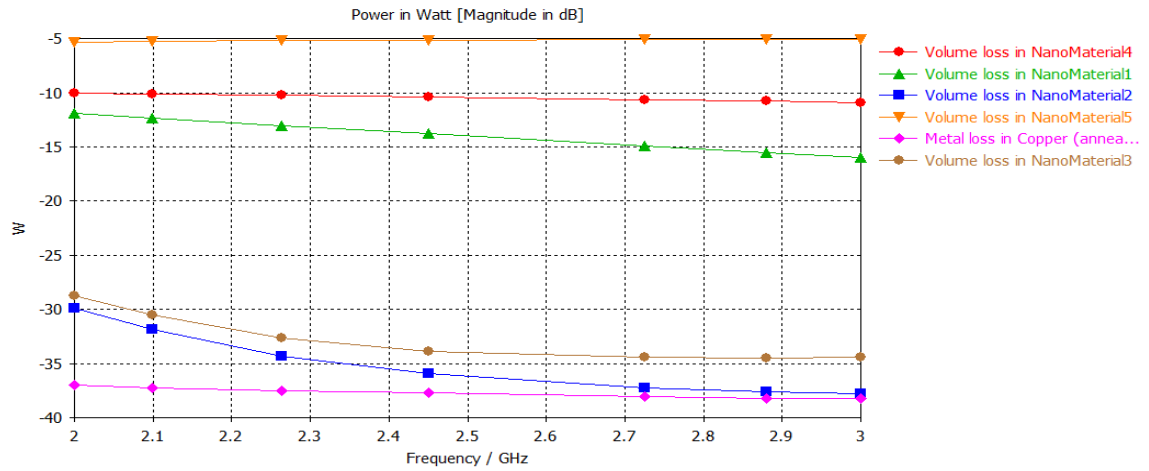
5.3.1.1 Resultados electromagnéticos. Debido a la baja concentración presenten en la región superior, la onda electromagnética penetra una mayor distancia dentro del material, distribuyendo las perdidas en un mayor volumen del mismo, en la figura 47 se observa la distribución de campo magnético.

Figura 47. Distribución del campo magnético



A pesar que no logra alcanzar sustancialmente el centro de la muestra, el consumo de potencia se torna más uniforme que en los casos anteriores, como se ve en la figura 48.

Figura 48. Potencia absorbida por los materiales



5.3.1.2 Resultados termicos. En la figura 49 se presenta la distribución de temperatura. La muestra para esta simulación presenta un calentamiento más uniforme, reduciendo la diferenciación de temperatura entre la región superior e inferior observada anteriormente. De igual manera el máximo de temperatura se encuentra en la parte superior en el área central por lo que sigue existiendo una diferencia de temperatura (Figura 50).

Figura 49. Perfil de temperatura del sistema.

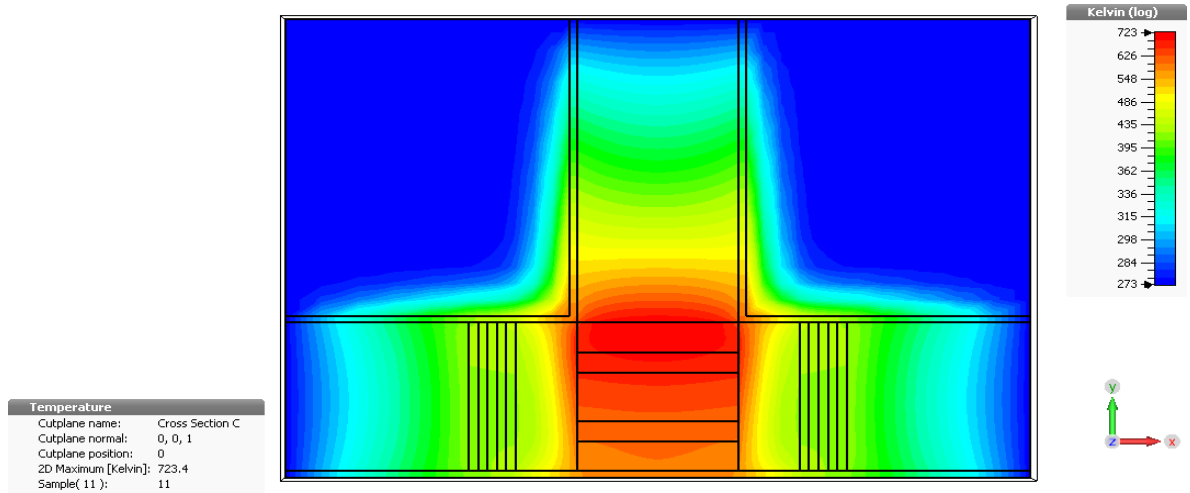
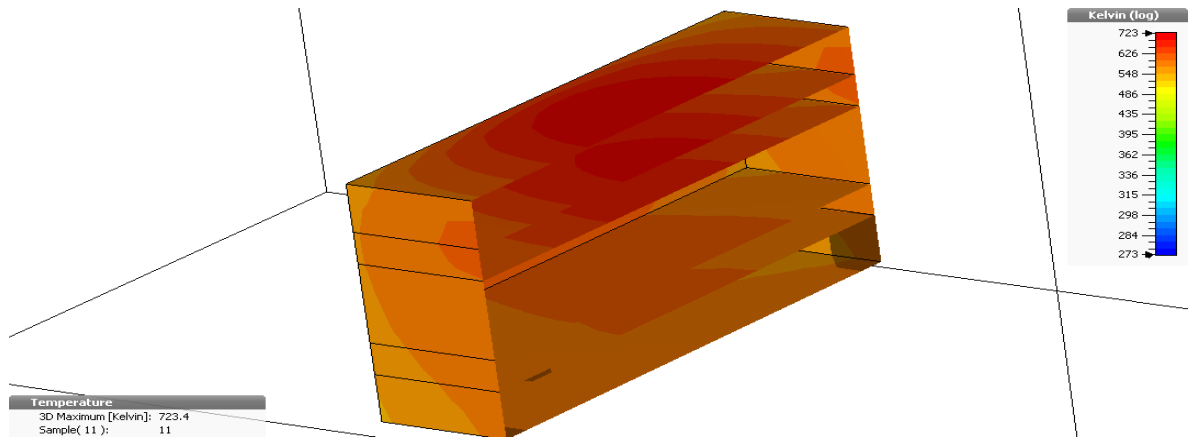
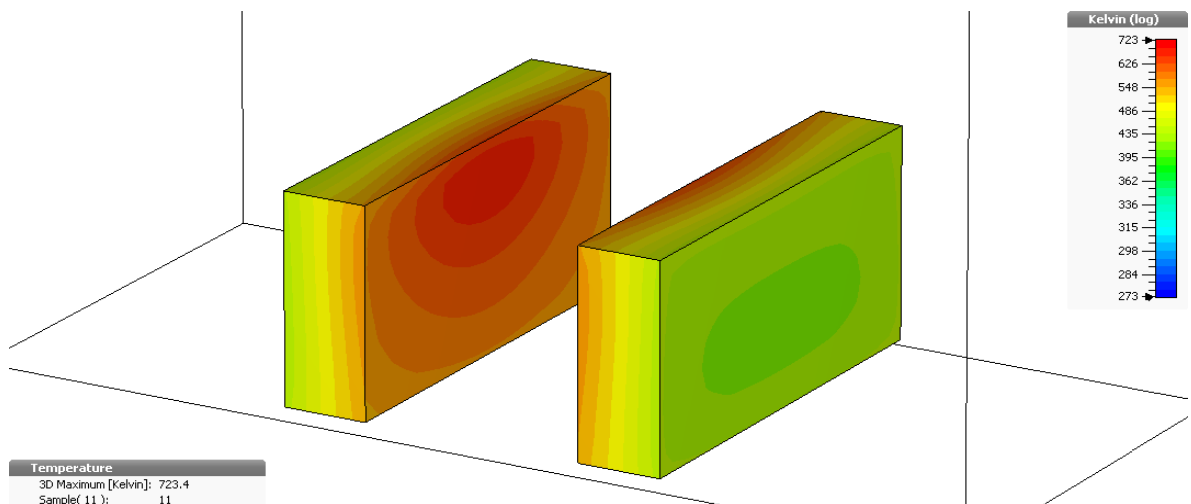


Figura 50. Perfil de temperatura de la muestra.



El calentamiento de las placas de cuarzo (Figura 51), sigue el patrón observado en las simulaciones anteriores, donde debido a la conducción, sus máximos de temperatura corresponden al perfil del material dopado. Aíslan en gran medida la temperatura que llega a los absorbedores electromagnéticos manteniendo estos a una temperatura cercana a los 395 K.

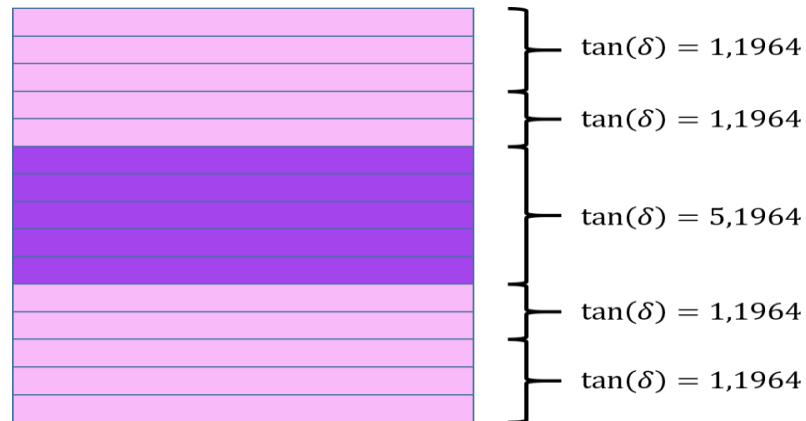
Figura 51. Perfil de temperatura de las placas de cuarzo.



5.3.2 Mayor concentración en el centro de la muestra. Se ubicó el material con mayor tangente delta magnético en el área central de la muestra y a su alrededor

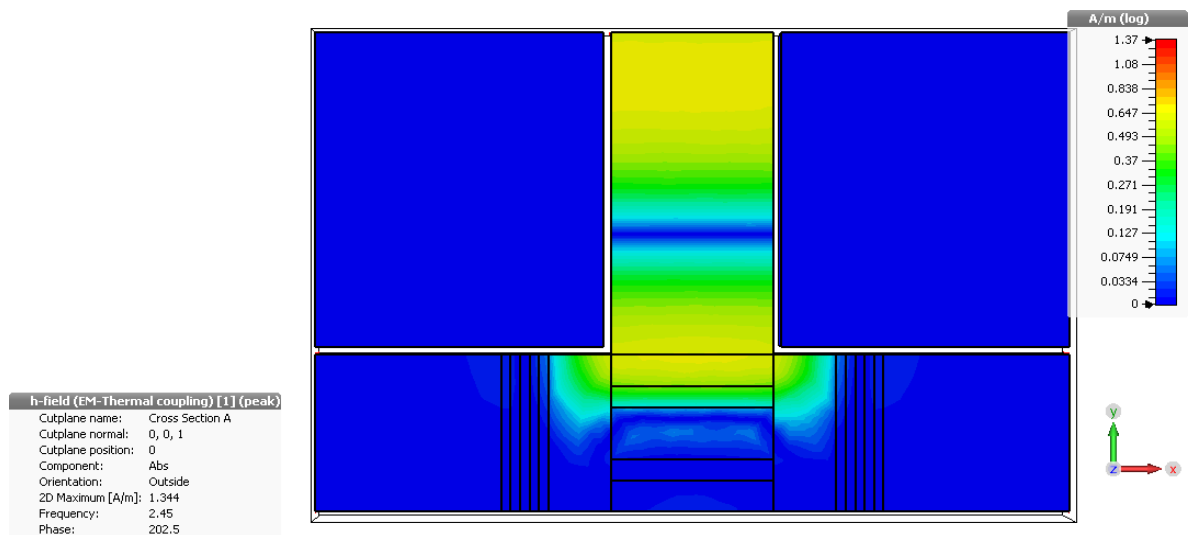
se rodeó un material de bajo tangente delta magnético, para simular una alta concentración en un volumen reducido como se muestra en la figura 52.

Figura 52. Distribución del material ferromagnético en la muestra.



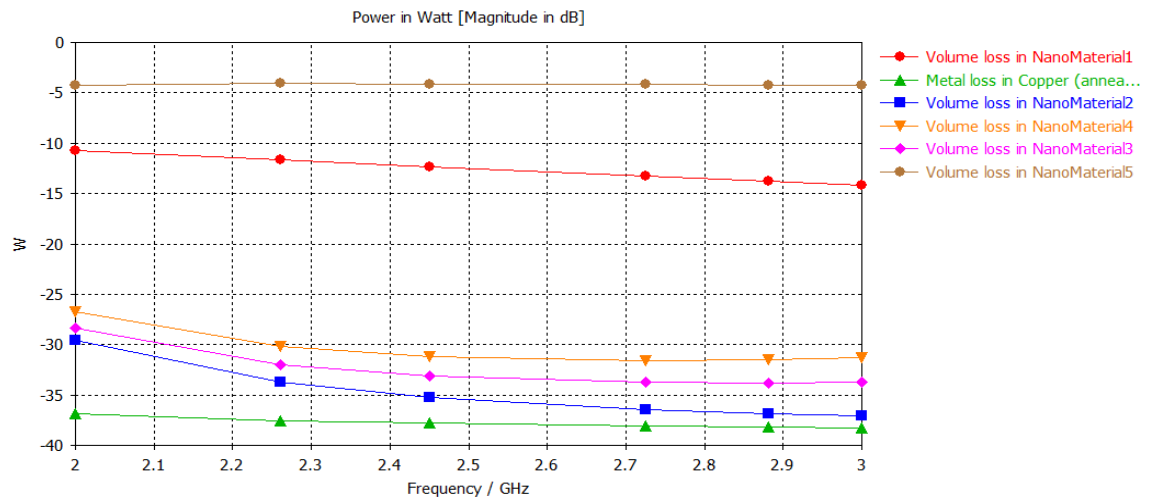
5.3.2.1 Resultados electromagnéticos. En la figura 53 se observa que el campo magnético logra penetrar hasta el centro de la muestra. Al tener una baja concentración antes de la región central se reduce la absorción de la onda electromagnética lo que mejora la distribución de campo y penetración sobre el material.

Figura 53. Distribución de campo magnético.



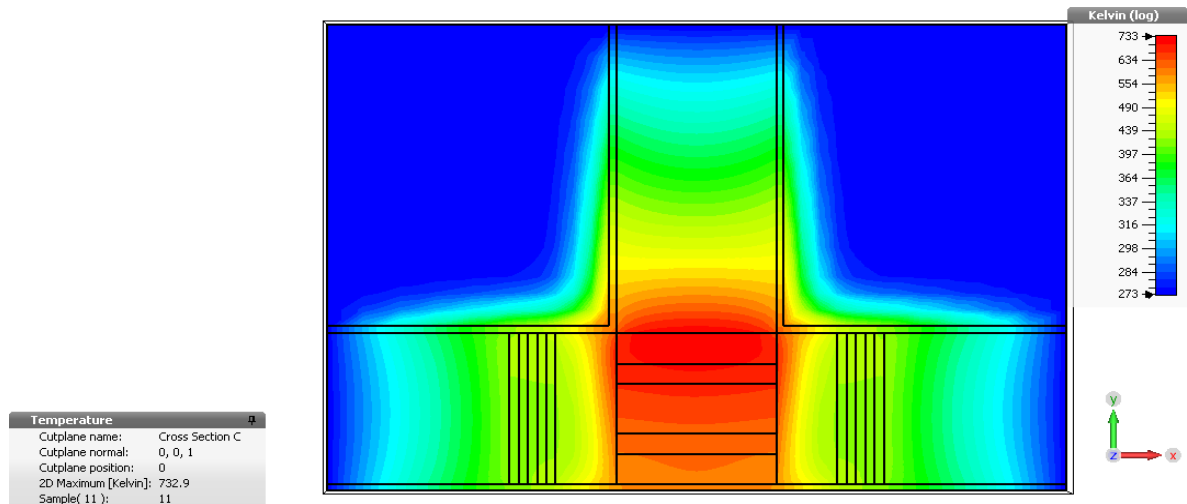
Al igual que el caso anterior, la potencia absorbida por los dos materiales utilizados es más uniforme, aunque sigue siendo mayor en la parte superior de la muestra, donde tiene la menor concentración pero mayor contacto con la onda electromagnética incidente, ver figura 54.

Figura 54. Potencia absorbida



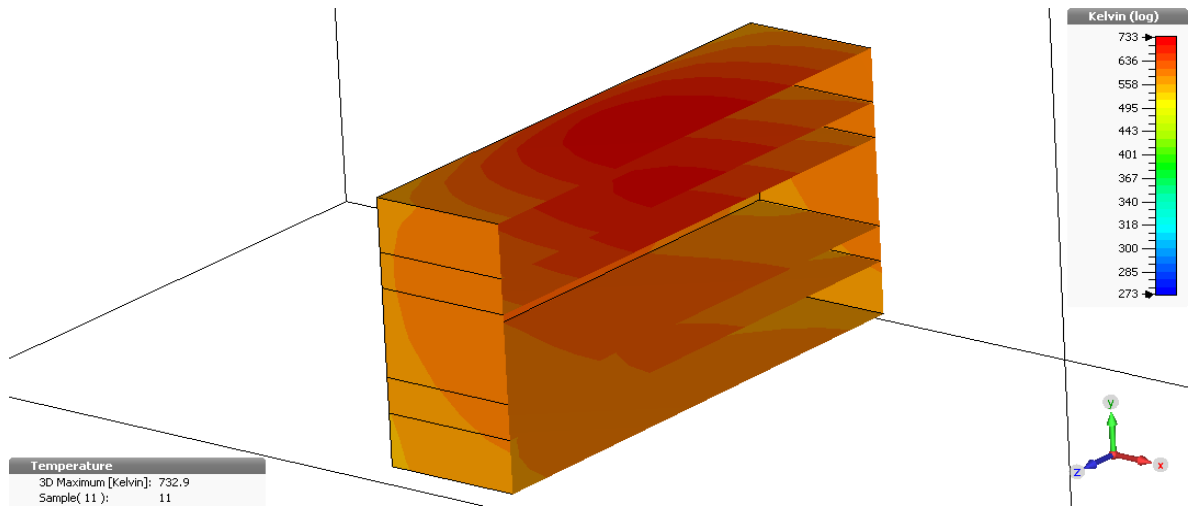
5.3.2.2 Resultados termicos. Alcanza una mayor temperatura que el caso anterior, pero sigue presentando el máximo en la parte superior. La distribución de temperatura se observa en la figura 55.

Figura 55. Distribución de temperatura



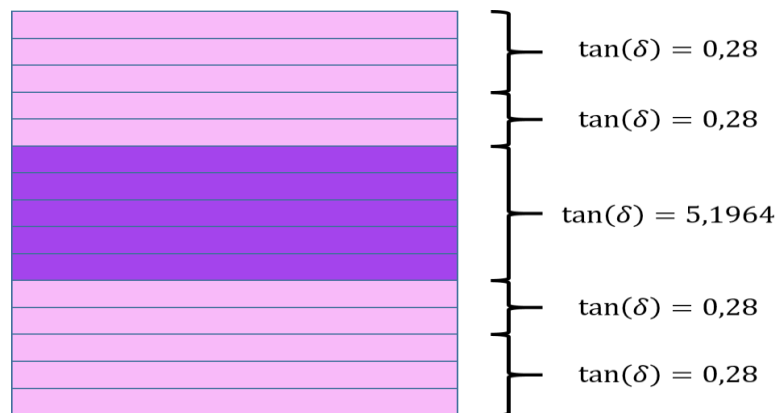
El calentamiento de la muestra no presenta cambios significativos con respecto a la simulación anterior, solo un aumento en el máximo de temperatura pero su distribución conserva el mismo patrón como se observa en la figura 56.

Figura 56. Distribución de temperatura en la muestra



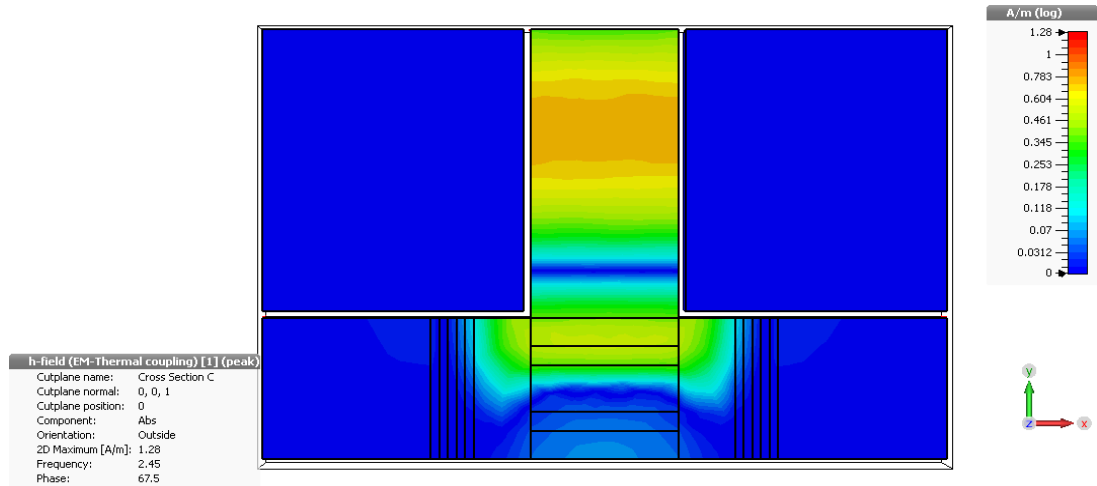
5.3.3 Maxima concentración en el centro de la muestra. Se redujo aún más la concentración en las placas que rodean la placa central, con la finalidad de permitir a la onda electromagnética calentar el área de mayor concentración tal como se muestra en la figura 57.

Figura 57. Distribución del material ferromagnético en la muestra.



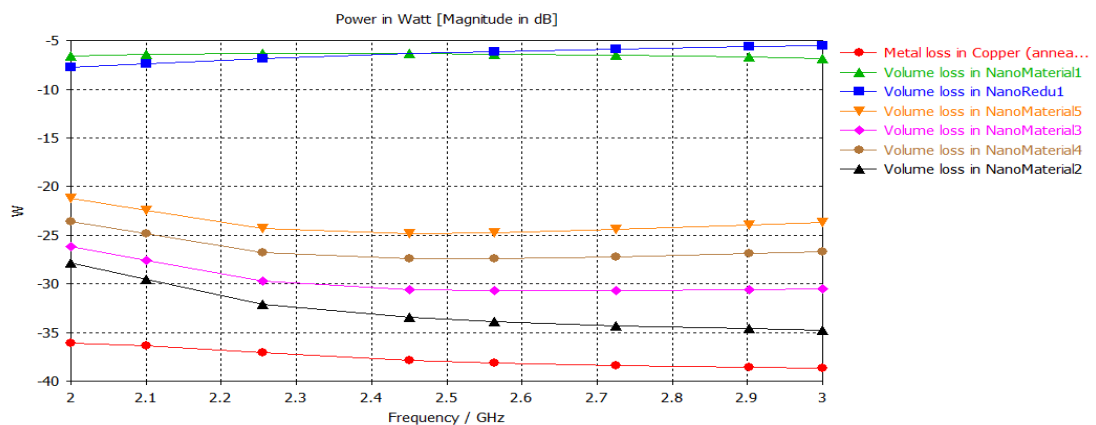
5.3.3.1 Resultados electromagnéticos. Con este modelo se logra que la onda electromagnética penetre en la muestra hasta su centro, donde se encuentra la mayor concentración del material ferromagnético, tal como se muestra en la figura 58.

Figura 58. Distribución de campo magnético.



El consumo de potencia por las placas de material que conforman la muestra es uniforme como se observa en la figura 59. Este fenómeno debe principalmente a la baja concentración simulada antes de la placa central, lo que permite que la energía alcance una mayor profundidad en la muestra.

Figura 59. Potencia absorbida



5.3.3.2 Resultados termicos. El dopado implementando permite una mayor uniformidad en el proceso de calentamiento, reduciendo las diferencias de temperatura a través de la muestra (Figura 60) y por el sistema utilizado este calentamiento se concentra en el área de interés.

A pesar de ser más uniforme sigue existiendo una diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la muestra ya que como la primera también absorbe ondas electromagnéticas se calienta tanto por la energía absorbida como por la conducción de calor de la placa central como se muestra en la figura 61.

Figura 60. Perfil de temperatura del sistema.

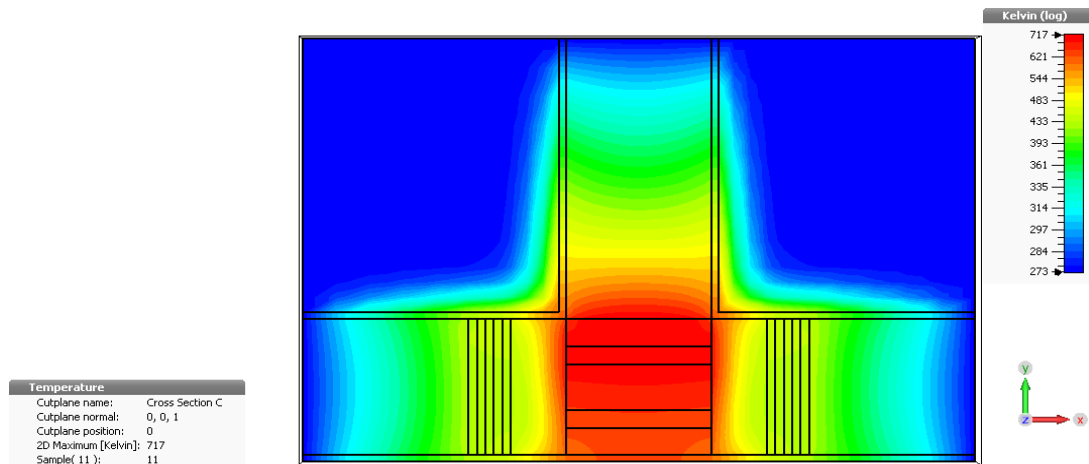
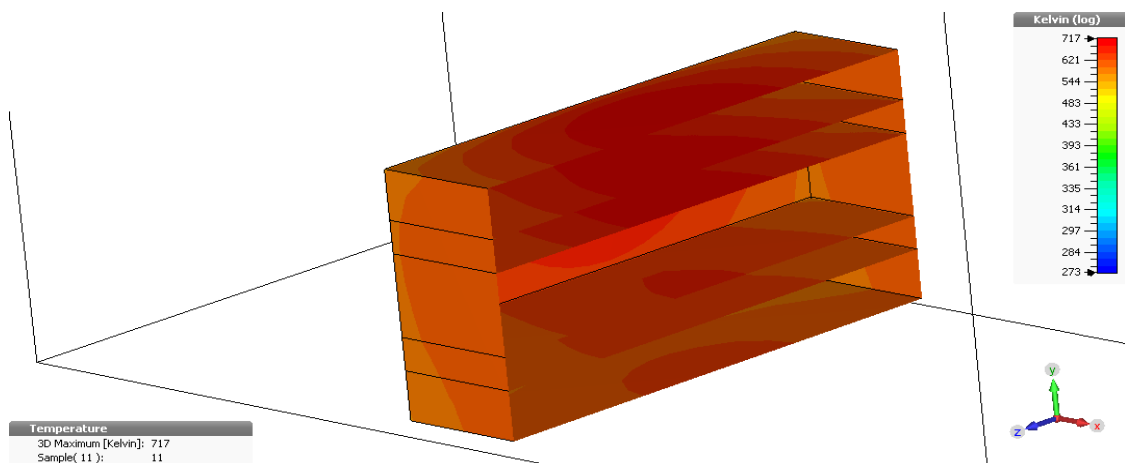


Figura 61. Perfil de temperatura de la muestra.



5.4 DISEÑO NO SIMETRICO DE CONFIGURACIÓN T PLANO E.

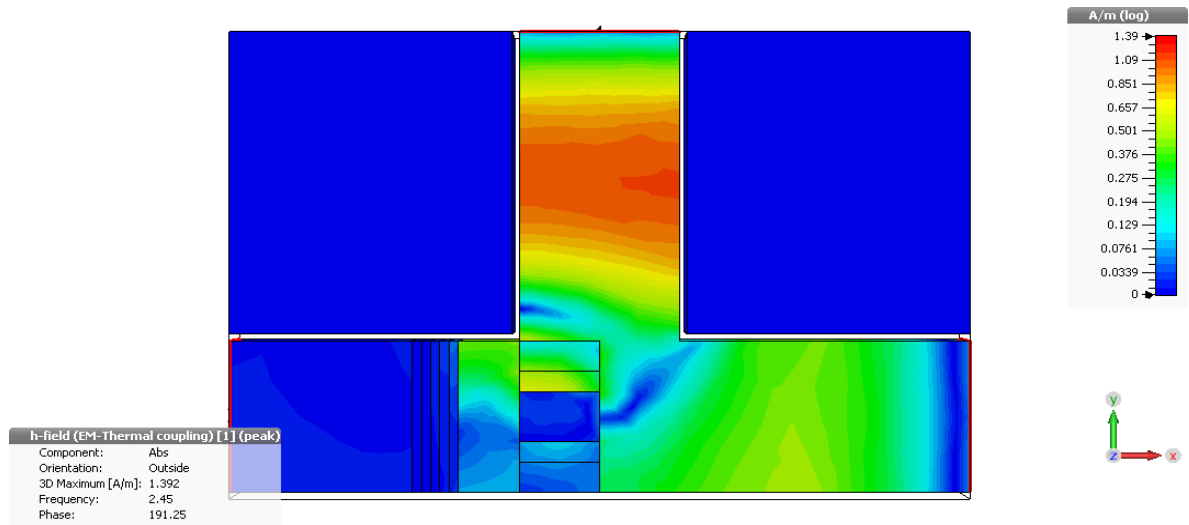
Para simplificar los cálculos y el tiempo de computo, los diseños de simulación se hacen de forma simétrica pero es importante analizar los efectos que tiene en la distribución de temperatura y de potencia en el sistema una componente asimétrica, más cercano a los problemas reales.

Para simular este problema en el brazo principal de la configuración T plano E del se dispuso la mitad de la muestra y un solo absorbedor con su respectiva placa de cuarzo, dejando libre el otro extremo de la guía de onda.

5.4.1 Simulación electromagnética. El campo magnético se divide de forma diferente debido a la diferencia de impedancia que genera la asimetría, como en la parte derecha no encuentra obstáculos este no se atenúa significativamente, contrario lo que sucede hacia la izquierda donde se comporta como en las simulaciones realizadas anteriormente.

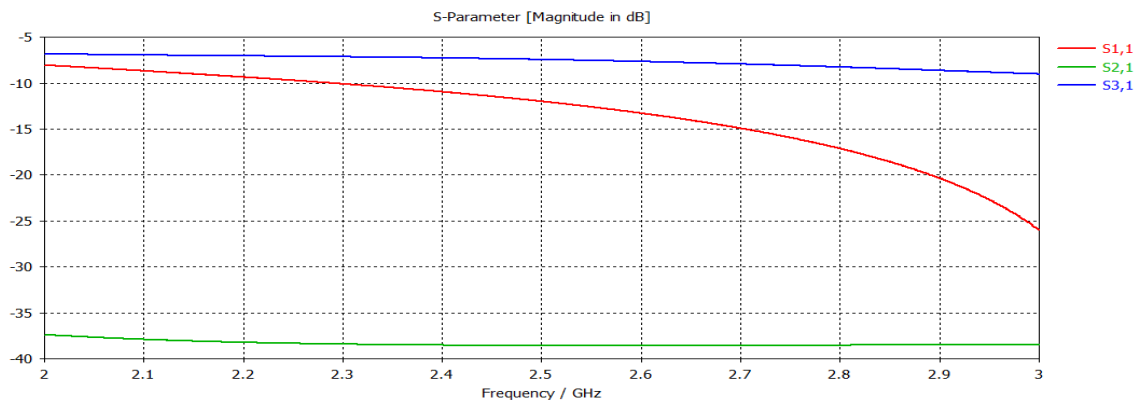
Es importante destacar que una mayor área de la muestra se ve expuesta al campo magnético, por tanto, la interacción de este con el material es mayor. Ver figura 62.

Figura 62. Distribución de campo magnético en la guía con configuración asimétrica.



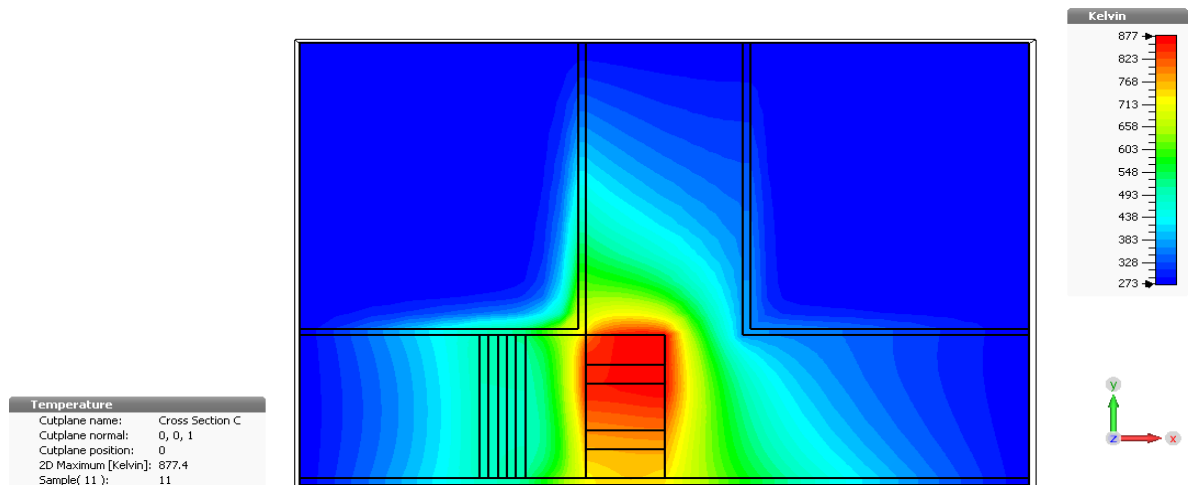
Producto de la pérdida de simetría en el brazo principal de la configuración T plano E, los parámetros S21 y S31 presentan un comportamiento diferente. El parámetro S21 que se encuentra en contacto con el absorbedor y la muestra posee un mayor índice de refracción. El parámetro S31 presenta el menor índice de refracción, siendo menor que el S11. Como se muestra la figura 63.

Figura 63. Parámetros S



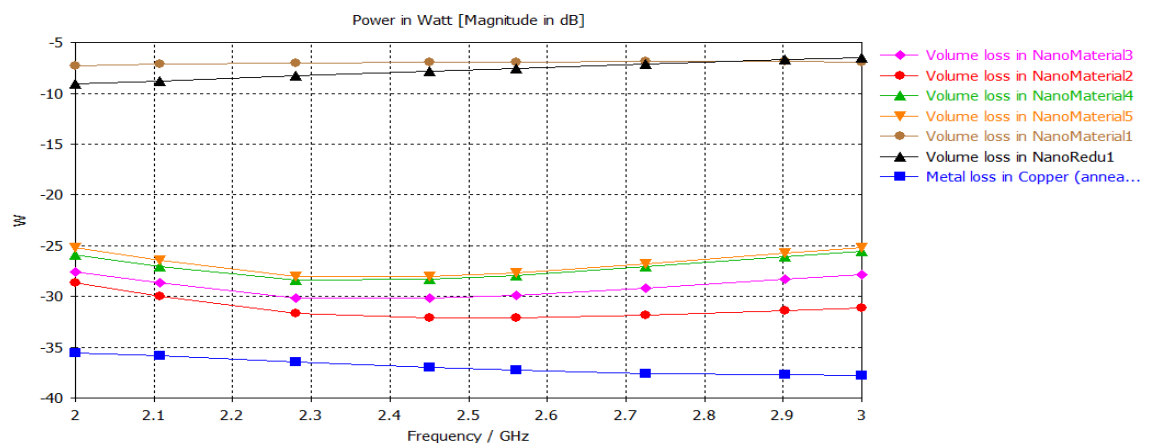
5.4.2 Simulación termica. La temperatura alcanzada por la muestra es mayor que en los casos anteriores, se concentra en la región superior de la misma pero de distribuye de manera menos uniforme como se observa en la figura 64.

Figura 64. Perfil de temperatura del sistema.



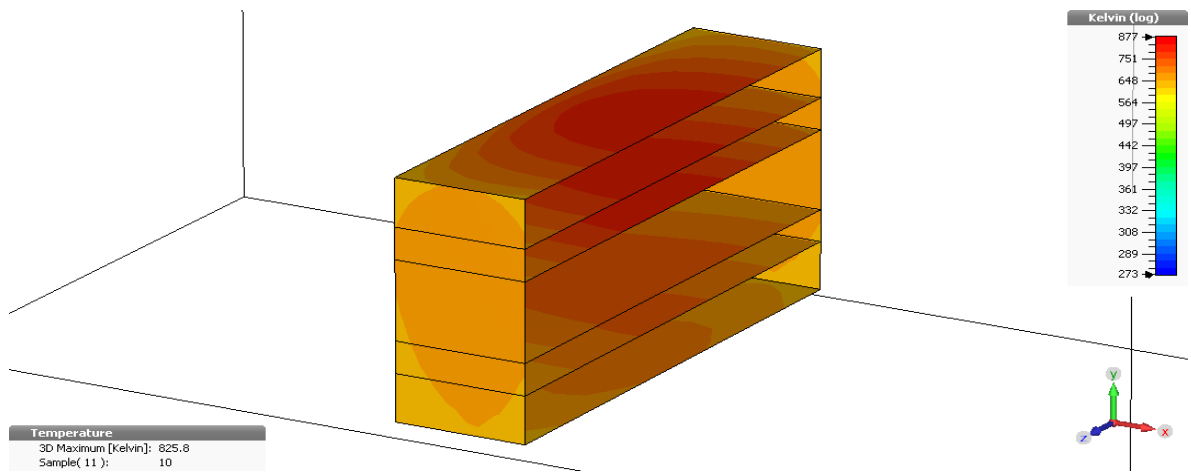
La potencia absorbida por las placas de menor concentración es menor que la absorbida por la placa central, esto se debe a la división de la onda electromagnética dentro de la guía. Por tanto, el calentamiento es menos uniforme que el caso anterior. Los valores de potencia se presentan en la figura 65.

Figura 65. Potencia absorbida por material.



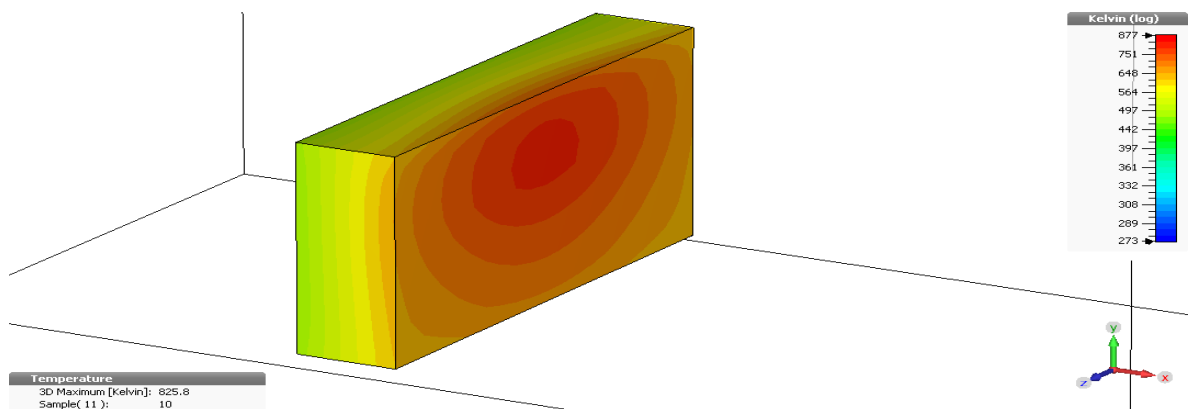
A pesar de la asimetría que se presenta, el perfil de temperatura dentro de la muestra presenta un comportamiento similar a los casos anteriores en donde su región superior posee los máximos de temperatura que van disminuyendo conforme se desplaza al interior de la muestra, con la diferencia de que la temperatura alcanzada es mayor (Figura 66).

Figura 66. Distribución de temperatura por capas en la muestra



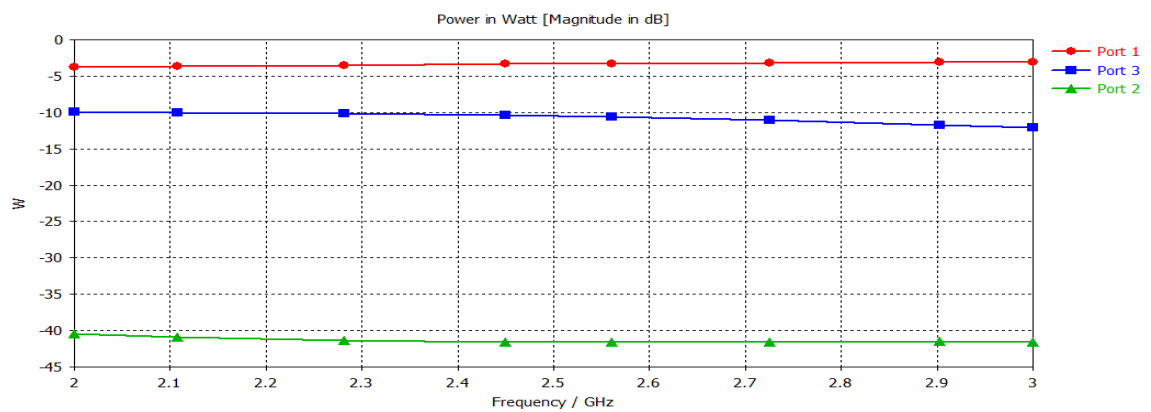
De igual manera sucede con el perfil de temperatura de las placas de cuarzo el cual alcanza valores mayores que en los casos anteriores pero el comportamiento en la distribución presenta el mismo patrón (Figura 67).

Figura 67. Perfil de temperatura en la placa de cuarzo



En la figura 68 se observa la potencia medida en los puertos del sistema, contrario a los casos anteriores donde la potencia en los puertos dos y tres era igual, en este caso se observa que en el puerto tres correspondiente a la región donde se eliminó el absorbedor y la placa de cuarzo el valor es mucho mayor debido a que no hay elementos que atenúen el campo electromagnético que se desplaza en esa dirección.

Figura 68. Potencia en los puertos del sistema.

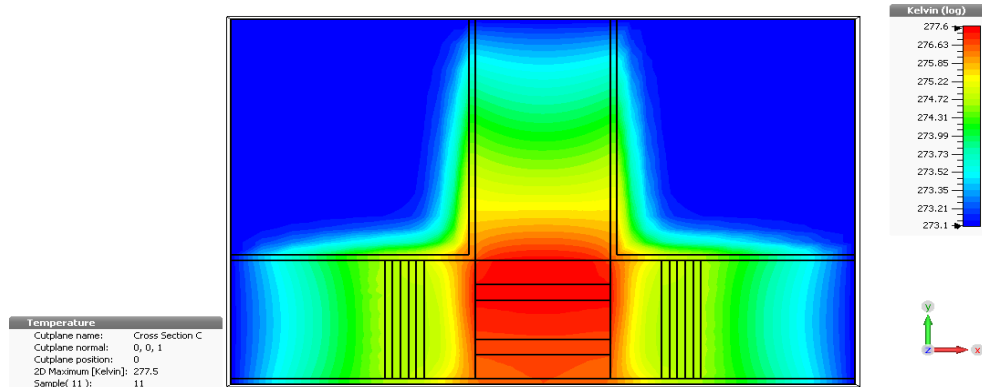


5.5 DISMINUCIÓN DE LA POTENCIA APLICADA

En algunas aplicaciones, no es posible aplicar ondas electromagnéticas con alta potencia debido a la temperatura máxima que pueden soportar ciertos sistemas. Para esta simulación se disminuyó la potencia aplicada sobre la muestra y se analizó su perfil de temperatura.

La potencia aplicada es de 10 [W] que corresponde al 1% de la utilizada en las simulaciones anteriores. El perfil de temperatura obtenido se muestra en la figura 69.

Figura 69. Perfil de temperatura del sistema.

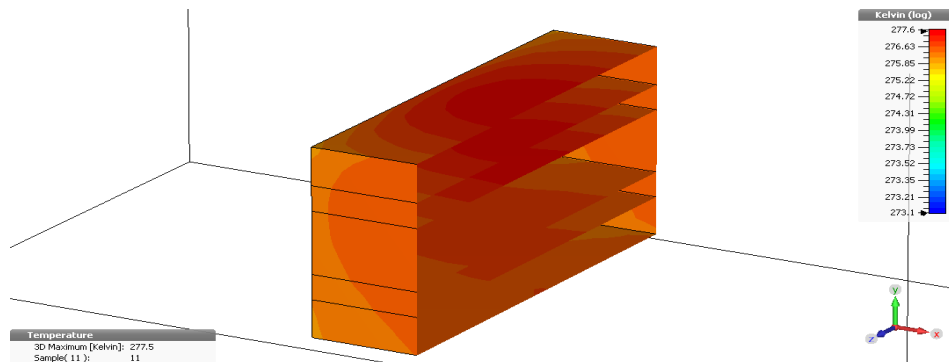


La temperatura maxima alcanzada es de 277,5 K, los maximos de temperatura se localizan en la parte superior de la muestra y van disminuyendo conforme se avanza hacia el inferior de la muestra. Se logro elevar la temperatura aproximadamente en 4 K.

Este control de potencia permite adaptar los diseños propuestos en aplicaciones de baja potencia como es el caso de problemas medicos.

En la figura 70 se observa que el perfil de temperatura de la muestra coincide con los realizados en simulaciones anteriores, por tanto, la potencia aplicada no afecta la distribución de las perdidas magneticas, solo influye en el valor de temperatura alcanzado.

Figura 70. Perfil de temperatura por capas en la muestra



5.6 VARIACIÓN EN LA FRECUENCIA DE LA ONDA ELECTROMAGNETICA APLICADA

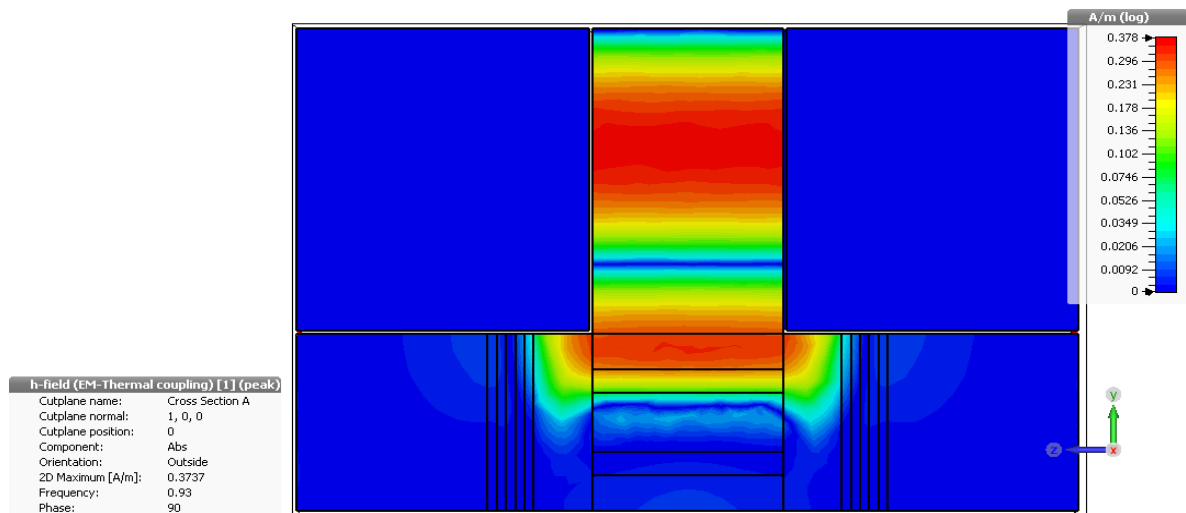
Las propiedades de los materiales ferromagneticos dependen fuertemente de la frecuencia de operación especialmente la permeabilidad magnetica, que esta directamente relacionada con el calentamiento a traves de ondas electromagneticas.

Para analizar este efecto se utilizó el diseño de configuración T plano E capaz de transmitir ondas electromagneticas en el modo fundamental a una frecuencia de 0.930 [GHz], la cual es un estandar comercial.

Debido a que la frecuencia de operación es menor, la penetración de la onda sobre la muestra es mayor, como se muestra en la figura 71.

5.6.1 Simulación electromagnética.

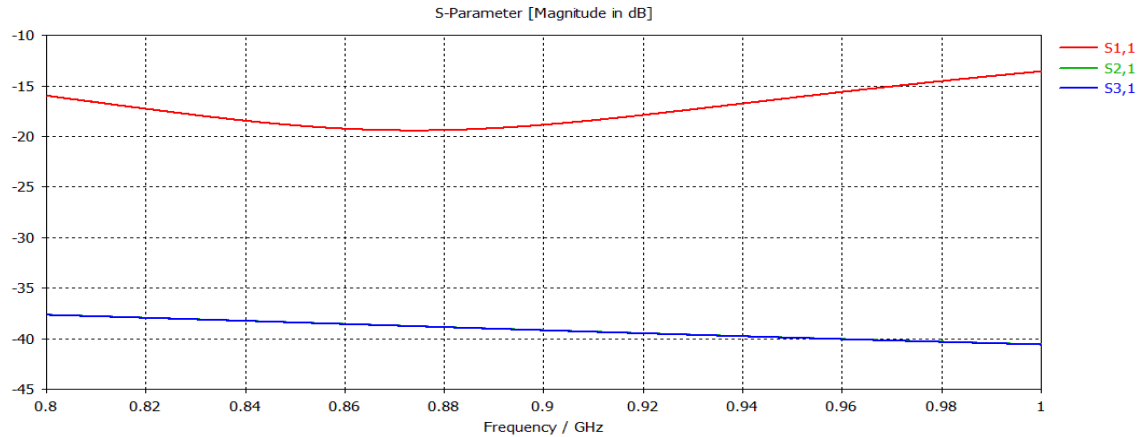
Figura 71. Distribución de campo magnetico a 930 [MHz].



El indice de refraccion para el puerto de entrada (1) es menor que en los casos anteriores, por tanto, mayor cantidad de energia es absorbida por la muestra. Los

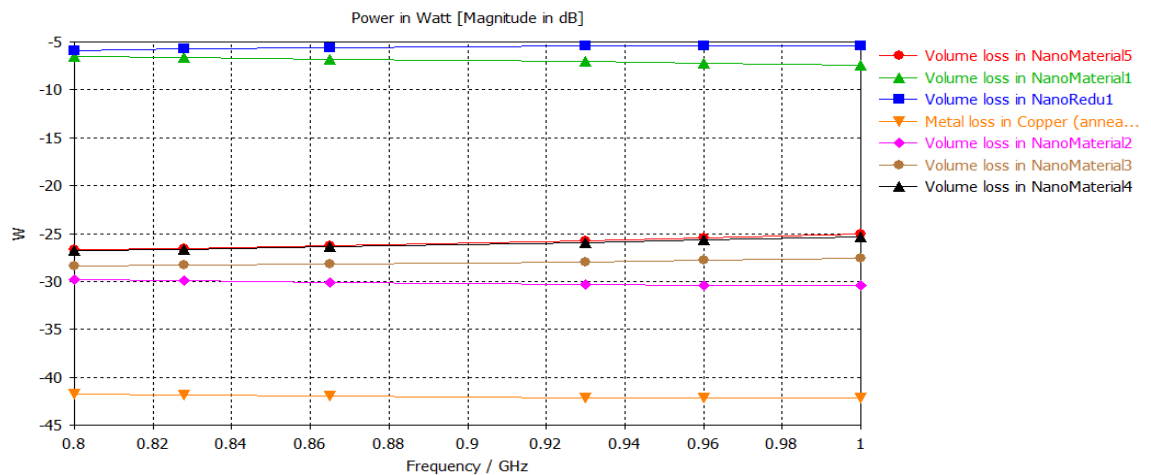
parametros S21 y S31 presentan comportamiento similar a los casos anteriores y debido a la simetria del sistema estos tambien son iguales. Ver figura 72.

Figura 72. Parámetros S.



Como la onda aplicada alcanza una mayor profundidad en la muestra, la potencia absorbida por los materiales ferromagneticos es mas uniforme (Figura 73).

Figura 73. Potencia absorbida por material a 930 [MHz].



5.6.2 Simulación termica. Los maximos de temperatura se concentran en la parte superior de la muestra, disminuyendo rapidamente conforme se desplaza hacia la

parte inferior de la guía (Figura 74). A pesar que la penetración de la onda es mayor, la transformación de energía electromagnetica en calor es menor. En la figura 75 se observa que no se presenta un cambio significativo en la temperatura, por tanto, es mas eficiente utilizar 2.45 [GHz].

Figura 74. Perfil de temperatura del sistema

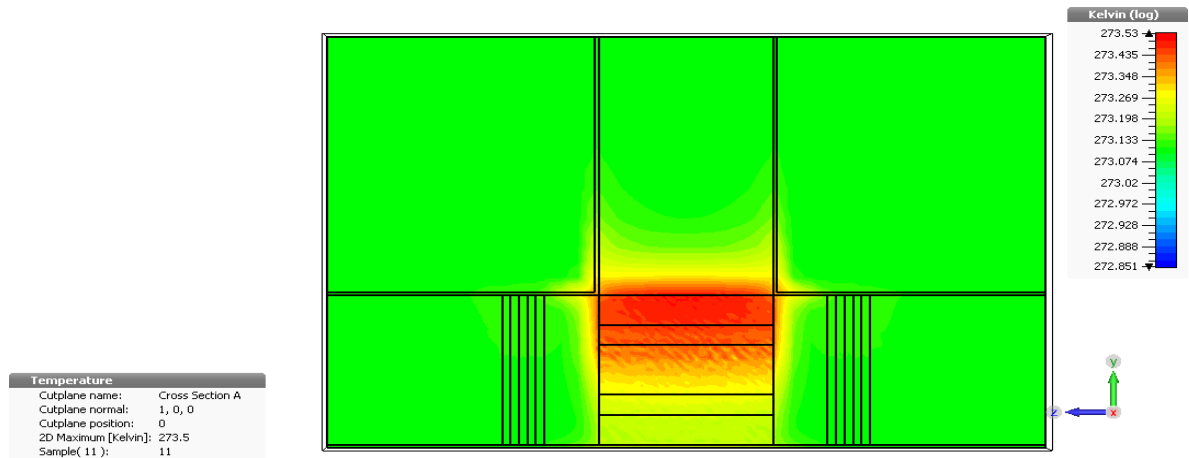
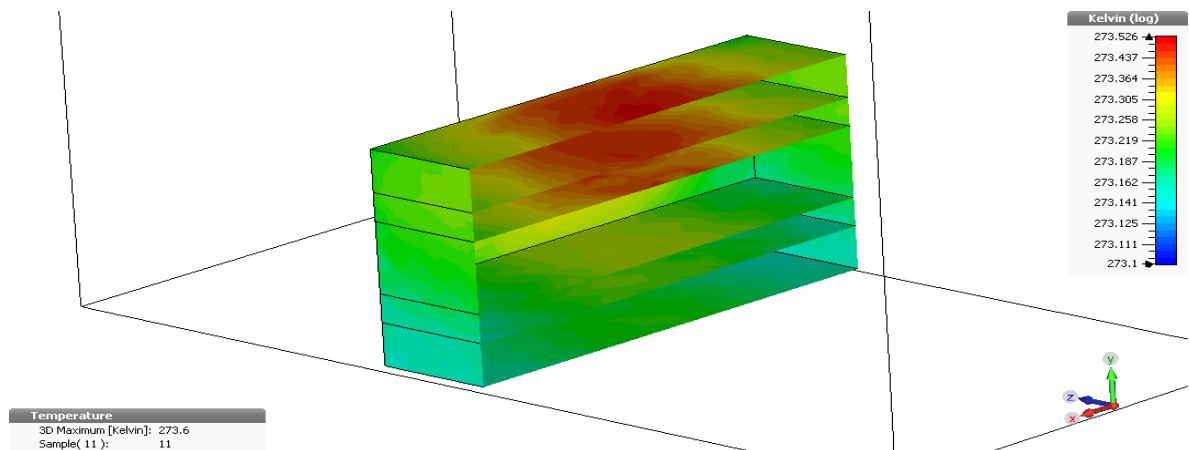


Figura 75. Perfil de temperatura de la muestra.

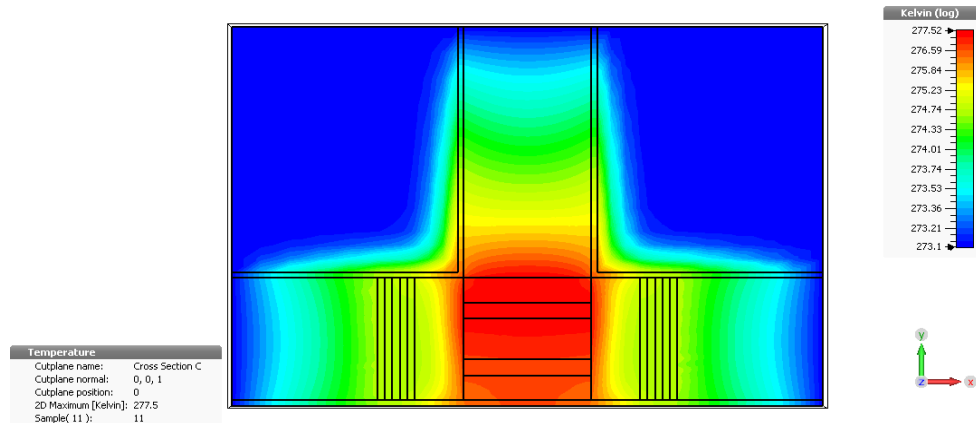


5.7 VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Variando el tiempo en que la muestra es irradiada con microondas se obtuvo los siguientes resultados.

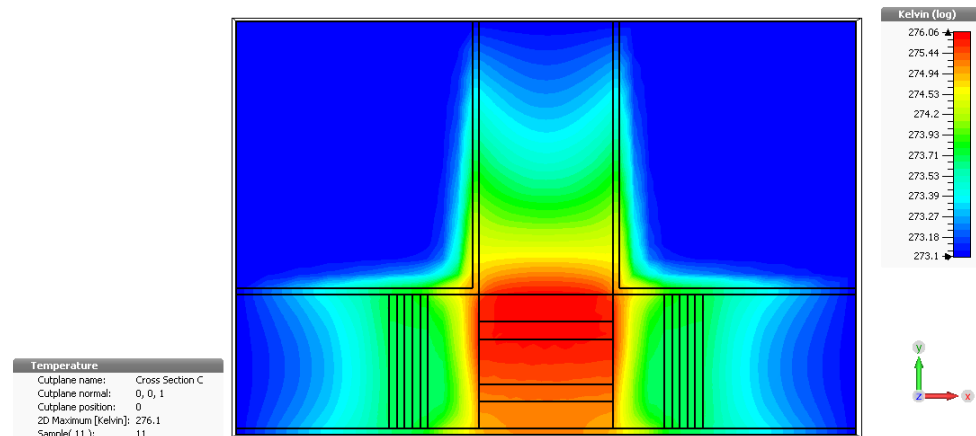
Para un tiempo de exposición de 60 segundos (Figura 76), el máximo valor de temperatura alcanzado es de 277,5 K. La temperatura sobre la muestra se distribuye de manera uniforme, con pequeñas variaciones conforme se avanza hacia la parte inferior de la misma. Esta diferencia de temperatura se debe a la penetración de la onda.

Figura 76. Perfil de temperatura del sistema con 60 segundos de radiación.



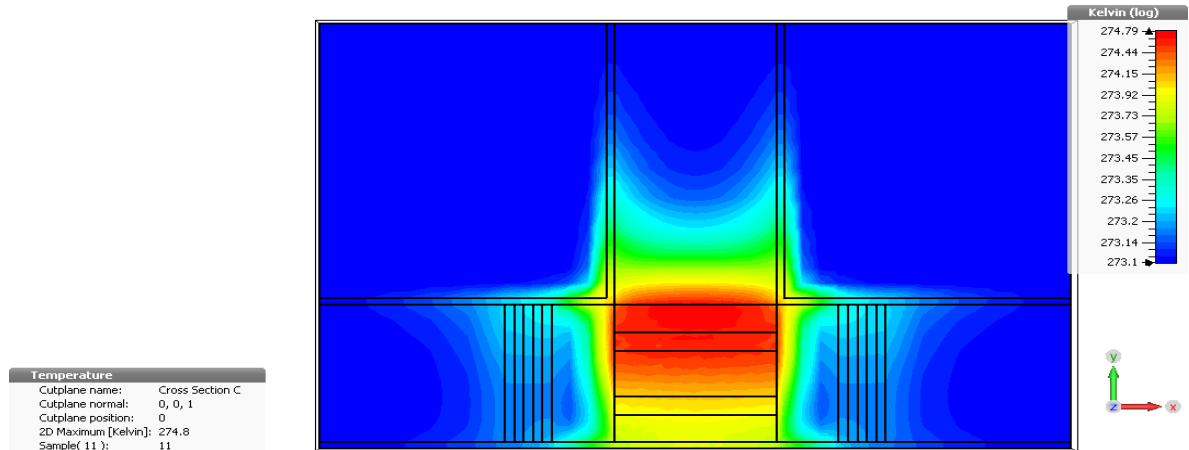
Reduciendo el tiempo de exposición a 30 segundos se alcanza un máximo de temperatura de 276,1 K, además, la distribución de la temperatura empieza a perder uniformidad presentando una mayor temperatura en la región superior y la menor en la parte inferior de la muestra como se observa en la figura 77.

Figura 77. Perfil de temperatura del sistema con 30 segundos de radiación.



Finalmente se utilizó un tiempo de exposición de 10 segundos, donde se alcanza un valor máximo de temperatura de 274,8 K . La distribución de campo no es uniforme y se observa una marca diferencia en la temperatura de la parte superior e inferior de la muestra. Ver figura 78.

Figura 78. Perfil de temperatura del sistema con 10 segundos de radiación



Estas diferencias en la uniformidad del calentamiento conforme varia el tiempo de exposición se deben principalmente a la conducción de temperatura en el sistema, entre mas corto es el tiempo menos calor por conducción sera distribuido sobre el sistema, aumentando los puntos frios.

6. CONCLUSIONES

- Utilizar materiales ferromagnéticos para dopar estructuras y estimular la absorción interacción con ondas electromagnéticas permite calentar arreglos que en condiciones normales no absorben energía de electromagnética o donde se quiere minimizar la interacción con el campo eléctrico debido a características del medio.
- Aislar adecuadamente la región de interés, permitió que la energía térmica absorbida a través de las ondas electromagnéticas fuera utilizada de manera eficiente y no se propagara a otras partes del sistema, afectando posibles dispositivos o elementos, además, permite obtener temperaturas mayores aplicando la misma potencia y con la misma estructura.
- Para obtener mayor uniformidad en el calentamiento de una muestra dopada con material ferromagnético fue necesario localizar la concentración del mismo en el menor volumen posible, de esta manera los campos aplicados calentaron la región central de la muestra y esta se distribuyó por conducción a lo largo de la misma. Si esta concentración se estratifica, se crea un perfil de temperatura que varía conforme la onda se propaga y es absorbida por el material.
- La utilización de estructuras simétricas garantizó la división de potencia en partes iguales. En estructuras que no tienen esa característica o en aplicaciones cuya geometría no posee simetría, la distribución de la potencia dependerá de los materiales y la impedancia del medio de propagación. Es importante conocer estas características para evitar que las ondas electromagnéticas afecten áreas sensibles del sistema.

- Las estructuras dopadas con materiales ferromagnéticos absorbieron energía de ondas electromagnéticas en altas y bajas potencias. La distribución de las pérdidas dieléctricas no se vio afectada por la potencia de la onda incidente.
- La frecuencia de la onda aplicada influyó directamente en las pérdidas dieléctricas, para el caso de estudio se obtuvo mejores resultados aplicando ondas electromagnéticas a una frecuencia de 2.45 [GHz] a pesar de que la capacidad de penetración es menor.
- Para tiempos de exposición altos a radiación por ondas electromagnéticas, se alcanzó una mayor uniformidad en la distribución de temperatura sobre las muestras y una mayor temperatura sobre las mismas.

7. RECOMENDACIONES

- Optimizar la frecuencia de operación para el material a calentar incluyendo la variación de permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética en función de la frecuencia.
- Establecer en el software una función que defina la distribución del material ferromagnético sobre la estructura dopada en lugar de utilizar placas. De esta forma se lograría se obtendrían resultados más acordes con los procesos reales.

REFERENCIAS

1. *Aplicaciones biomédicas de las nanopartículas magnéticas*. Ramos, Milagros y Castillo, Claudia. 2011, Ide@s CONCYTEG, págs. 629-646.
2. Leon, Angel. Componentes de microondas. 2006, págs. 193-198.
3. Tomasi, Wayne. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Mexico : s.n., 2003, págs. 409-418.
4. Zozaya, A.J. Ondas Guiadas. Valencia : s.n., 2014, págs. 20-32.
5. *Las microondas en la industria, parte1: hipótesis sobre su interacción con la materia*. Correa, Rodrigo y Gualdron, Oscar. 1999, Energía y Computación.
6. *Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos*. Prado Gonjal, Jesus y Moran, Emilio. 2011.
7. José, M.M. Ingeniería de Microondas, técnicas experimentales. s.l. : Pearson Education, 2002.
8. *Síntesis orgánica asistida por microondas. Obtención de enol carbamatos, tetrahidroisoquinolinas, benzoazepinas, tiazolinas, sulfuros de fosfoles, isoflavonas, arilcumarinas, cumarinocumarinas y núcleos de dendrímeros. Aplicaciones*. Jose, C.C. 2013, Facultad de Ciencias, Universidad de Santiago de Compostela.
9. *Evaluación de transiciones coaxiales-guía de onda y antenas de parche para la uniformidad de campo eléctrico en cavidades de calentamiento por microondas*. C.M, Miriam, M.C, Juan y P.M, Juan. 2012.
10. S.T, Fabián. *Diseño y simulación de guías de onda para el calentamiento de materiales con microondas*. Colombia : s.n., 2008.
11. Gonzales Sandoval, Jorge Enrique y Bayona Acosta, Carlos José. *Aplicación del método de optimización por fuerza central (CFO), al diseño de un*

- absorbedor electromagnético óptimo*. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2013.
12. Ortiz Gelves, Rafael Armando y García Morantes, Edgar Sneyder. *Diseño de un absorbedor electromagnético multicapa mediante el método de la espiral*. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2013.
 13. Fend, Thomas, y otros, y otros. Experimental investigation of compact silicon carbide heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011.
 14. Physical Properties of Semiconductors. [En línea] Ioffe Physico-Technical Institute, 2001. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/index.html>.
 15. *RF DIELECTRIC PROPERTIES OF SiC CERAMICS AND THEIR*. Y. Takeuchi, T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, KEK, Tsukuba. 2005, Particle Accelerator Conference.
 16. Nebot del Busto, Eduardo. *Caracterización de dieléctricos a frecuencias de microondas*. Zaragoza : Universidad de Zaragoza, 2004.
 17. Hernández Oliva, Gonzalo. *Métodos Clásicos de Optimización para Problemas*. 2006.
 18. Sokol, Vratislav. Optimization Techniques in CST STUDIO SUITE. [En línea] https://www.cst.com/content/events/downloads/eugm2011/talk_6-1-4_cst_ugm_2011.pdf.
 19. Belén Arouxét, María. *Métodos computacionales de optimización sin derivadas para minimización con restricciones*. Argentina : s.n., 2013.
 20. Mena M, Patricio y Tapia L, Valeria. *Manual Introductorio a HFSS*.
 21. Mendoza Gutiérrez, Adriana. *Introducción al uso del software COMSOL Multiphysics*. Veracruz : s.n., 2013.

BIBLIOGRAFIA

Aplicaciones biomédicas de las nanopartículas magnéticas. Ramos, Milagros y Castillo, Claudia. 2011, Ide@s CONCYTEG, págs. 629-646.

Belén Arouxét, María. Métodos computacionales de optimización sin derivadas para minimización con restricciones. Argentina : s.n., 2013.

Evaluación de transiciones coaxiales-guía de onda y antenas de parche para la uniformidad de campo eléctrico en cavidades de calentamiento por microondas. C.M, Miriam, M.C, Juan y P.M, Juan. 2012.

Fend, Thomas, y otros, y otros. Experimental investigation of compact silicon carbide heat exchangers. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011.

Gonzales Sandoval, Jorge Enrique y Bayona Acosta, Carlos José. Aplicación del método de optimización por fuerza central (CFO), al diseño de un absorbedor electromagnético óptimo. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2013.

Hernández Oliva, Gonzalo. Métodos Clásicos de Optimización para Problemas. 2006.

José, M.M. Ingeniería de Microondas, técnicas experimentales. s.l. : Pearson Education, 2002.

Las microondas en la industria, parte1: hipótesis sobre su interacción con la materia. Correa, Rodrigo y Gualdron, Oscar. 1999, Energía y Computación.

Leon, Angel. Componentes de microondas. 2006, págs. 193-198.

Mena M, Patricio y Tapia L, Valeria. Manual Introductorio a HFSS.

Mendoza Gutiérrez, Adriana. Introducción al uso del software COMSOL Multiphysics. Veracruz : s.n., 2013.

Nebot del Busto, Eduardo. Caracterización de dieléctricos a frecuencias de microondas. Zaragoza : Universidad de Zaragoza, 2004.

Ortiz Gelves, Rafael Armando y García Morantes, Edgar Sneyder. Diseño de un absorbedor electromagnético multicapa mediante el método de la espiral. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2013.

Physical Properties of Semiconductors. [En línea] Ioffe Physico-Technical Institute, 2001. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/index.html>.

RF DIELECTRIC PROPERTIES OF SiC CERAMICS AND THEIR. Y. Takeuchi, T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, KEK, Tsukuba. 2005, Particle Accelerator Conference.

S.T, Fabián. Diseño y simulación de guías de onda para el calentamiento de materiales con microondas. Colombia : s.n., 2008.

Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos. Prado Gonjal, Jesus y Moran, Emilio. 2011.

Síntesis orgánica asistida por microondas. Obtención de enol carbamatos, tetrahidroisoquinolinas, benzoazepinas, tiazolinas, sulfuros de fosfoles, isoflavonas, arilcumarinas, cumarinocumarinas y núcleos de dendrímeros.

Aplicaciones. Jose, C.C. 2013, Facultad de Ciencias, Universidad de Santiago de Compostela.

Sokol, Vratislav. Optimization Techniques in CST STUDIO SUITE. [En línea] https://www.cst.com/content/events/downloads/eugm2011/talk_6-1-4_cst_ugm_2011.pdf.

Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Mexico : s.n., 2003, págs. 409-418.

Zozaya, A.J. Ondas Guiadas. Valencia : s.n., 2014, págs. 20-32.