



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y optimización de cavidad resonante para el sistema de deshidratación de frutas con microondas

Tesis para optar el Título de
Ingeniera Mecánico-Eléctrica
Ana Belén Calderón Reto

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico-Eléctrico
Alejandro Antonio Herencia Sullón

Asesores:
Dr. Ing. Justo Ernesto Oquelis Cabredo
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana

Piura, marzo de 2025

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Ana Belén Calderón Reto, egresada del Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 73675016, declaro que:

Soy autora del trabajo final titulado:

“Diseño y optimización de cavidad resonante para el sistema de deshidratación de frutas con microondas”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniera Mecánico-Eléctrica.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Alejandro Antonio Herencia Sullón, identificado con DNI: 75628580

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Dr. Ing. Justo Ernesto Oquelis Cabredo, identificado con DNI: 02885437
- Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana, identificado con DNI: 02850726

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 17/03/2025.



.....
Firma del autor¹



.....
Firma del asesor¹



.....
Firma del co-asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Alejandro Antonio Herencia Sullón, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 75628580, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Diseño y optimización de cavidad resonante para el sistema de deshidratación de frutas con microondas”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Mecánico-Eléctrico.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Ana Belén Calderón Reto, identificado con DNI: 73675016

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Dr. Ing. Justo Ernesto Oquelis Cabredo, identificado con DNI: 02885437
- Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana, identificado con DNI: 02850726

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 17/03/2025.



Firma del autor¹



Firma del asesor¹



Firma del co-asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen, por brindarme la alegría de llegar hasta este punto de mi vida profesional.

A mis padres, por apoyarme, por no dejarme sola y creer en mí en todos los momentos de mi carrera.

A todos los que, de alguna forma, fueron parte de este camino, y me dieron una razón para seguir.

Ana Belén Calderón Reto

A Dios, por brindarme su amor y fuerzas para nunca rendirme.

A mi abuela Francisca, por cuidarme, aconsejarme y siempre apoyarme en mi vida.

A mi abuelo Antonio, por cuidarme desde el cielo, y demostrarme que todo es posible.

A mi familia materna, por siempre estar conmigo.

Alejandro Antonio Herencia Sullón

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestros asesores el Dr. Ing. Justo Oquelis y Dr. Ing. Daniel Marcelo por su guía, consejo y paciencia durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad de Piura, nuestra casa de estudios, por brindarnos el espacio y los recursos necesarios para llevar a cabo nuestra investigación. También agradecemos al equipo de electrotecnia, por su apoyo técnico y valiosos aportes.

A mi compañero (a) de tesis por su colaboración, persistencia y apoyo en los momentos más difíciles.

Finalmente, a todas aquellas personas que participaron directa o indirectamente en este proyecto, muchas gracias.

Resumen

El enfoque de esta investigación es la evaluación e innovación de la cavidad de un horno microondas comercial con la finalidad de que se convierta en un sistema de deshidratación de frutas basado en tecnología de microondas con extracción de vapor, mejorando así el proceso de deshidratación. Inicialmente, se han estudiado los fundamentos teóricos relacionados a la energía de microondas y su efecto termodinámico en los alimentos para evaporar el agua contenida. Asimismo, los componentes y funcionamiento relacionados a los microondas comerciales.

Luego, se ha elaborado un manual de uso del software de elementos finitos ANSYS Electronics, específicamente de las herramientas HFSS y Icepak, para la aplicación de hornos microondas en donde se detalla su configuración para análisis electromagnético en altas frecuencias en la primera herramienta y su efecto termodinámico en la segunda. Tras conocer el procedimiento adecuado de simulación, se han validado prototipos realizados en artículos científicos utilizando las herramientas de ANSYS Electronics.

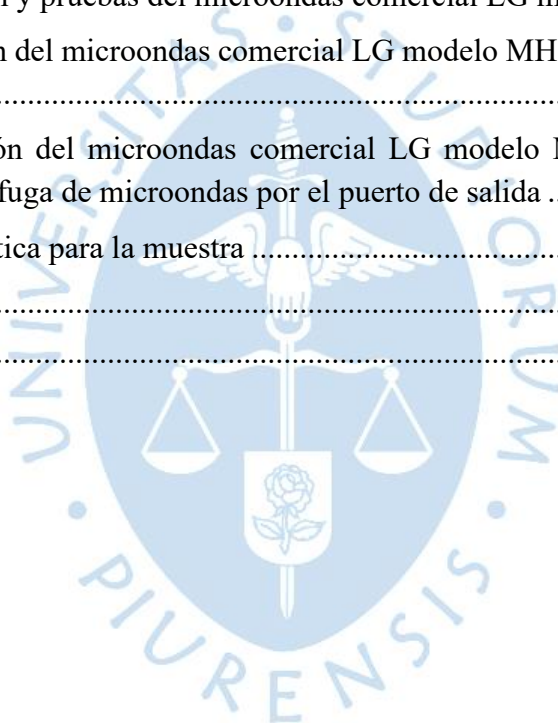
Posterior a ello, se ha simulado el horno microondas comercial adquirido y se ha validado mediante pruebas experimentales con una cámara termográfica, empleando muestras de papa bajo condiciones de simulación. Es así como, se han modelado tres escenarios: la cavidad real, la cavidad con un puerto de salida para la extracción de vapor para evaluar la fuga de microondas y otra cavidad con una protección en dicho puerto para evitar la fuga de microondas.

Los resultados confirman que el diseño propuesto puede optimizar la deshidratación y servir como base para futuras investigaciones, buscando implementar un prototipo basado en tecnología de microondas con extracción de vapor que garantice eficiencia, menores tiempos, costos más bajos y seguridad en el proceso. Asimismo, que mejore la calidad de los productos finales.

Tabla de contenido

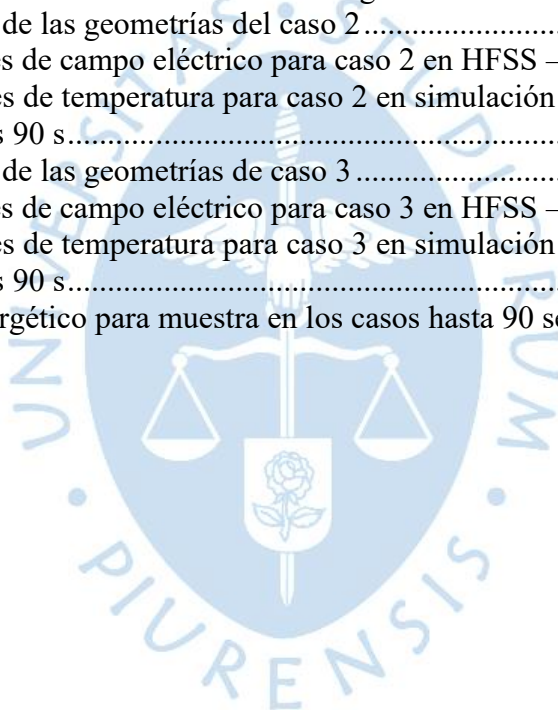
| | |
|--|----|
| Introducción | 14 |
| Capítulo 1 Estado del arte y fundamentos teóricos | 15 |
| 1.1 Marco histórico y estudios realizados | 15 |
| 1.2 Actualidad de la deshidratación en la Universidad de Piura | 17 |
| 1.3 Fundamentos físicos y aplicaciones de las microondas..... | 17 |
| 1.3.1 Principios de las ondas microondas en el espectro electromagnético | 17 |
| 1.3.2 Interacción de materiales con microondas y calentamiento resultante | 19 |
| 1.4 Fundamento de las ecuaciones de Maxwell en el campo electromagnético..... | 21 |
| 1.5 Mecanismos físicos de transferencia de calor | 22 |
| 1.5.1 Calentamiento convencional..... | 22 |
| 1.5.2 Calentamiento por microondas..... | 23 |
| 1.6 Tecnología de los hornos microondas | 23 |
| 1.6.1 Fundamentos operativos..... | 23 |
| 1.6.2 Dispositivos para calentamiento por microondas | 24 |
| 1.7 Análisis energético en productos expuestos a microondas..... | 31 |
| 1.8 Métricas para evaluar precisión de un modelo | 31 |
| Capítulo 2 Uso de ANSYS Electronics en la simulación de ondas electromagnéticas..... | 33 |
| 2.1 Método matemático de solución utilizado en ANSYS HFSS | 33 |
| 2.2 Proceso de Solución Adaptativa en HFSS..... | 34 |
| 2.3 Interfaz de usuario de ANSYS HFSS..... | 34 |
| 2.3.1 Gestor de proyectos | 35 |
| 2.3.2 Gestor de mensajes | 35 |
| 2.3.3 Ventana de propiedades..... | 36 |
| 2.3.4 Ventana de progreso | 37 |
| 2.3.5 Ventana del modelador 3D | 37 |
| 2.4 Proceso de Simulación en ANSYS HFSS | 38 |
| 2.4.1 Tipos de solución | 38 |
| 2.4.2 Generación de modelos paramétricos | 39 |
| 2.4.3 Análisis..... | 45 |
| 2.4.4 Resultados | 48 |
| 2.4.5 Bucle de solución | 49 |
| 2.5 Proceso de transferencia de HFSS a Icepak | 50 |
| 2.6 Interfaz de usuario y proceso de simulación en ANSYS Icepak | 52 |

| | |
|---|-----|
| Capítulo 3 Dinámica computacional con casos validados | 55 |
| 3.1 Validación con artículo 1 | 55 |
| 3.1.1 Condiciones de simulación | 55 |
| 3.1.2 Resultados de simulación..... | 56 |
| 3.1.3 Pasos de simulación propia | 57 |
| 3.2 Validación con artículo 2..... | 61 |
| 3.2.1 Condiciones de simulación | 61 |
| 3.2.2 Resultados de simulación..... | 63 |
| 3.2.3 Pasos de simulación propia | 65 |
| Capítulo 4 Casos, resultados y análisis | 73 |
| 4.1 Caso 1: Simulación y pruebas del microondas comercial LG modelo MH6536GIS..... | 73 |
| 4.2 Caso 2: Simulación del microondas comercial LG modelo MH6536GIS con inclusión de puerto de salida | 87 |
| 4.3 Caso 3: Simulación del microondas comercial LG modelo MH6536GIS adicionando protección para evitar fuga de microondas por el puerto de salida | 101 |
| 4.4 Evaluación energética para la muestra | 115 |
| Conclusiones | 116 |
| Referencias | 118 |



Lista de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Parámetros de identificación de ondas electromagnéticas con sus respectivos símbolos y unidades..... | 18 |
| Tabla 2: Propiedades dieléctricas de los materiales para el estudio de ondas electromagnéticas | 20 |
| Tabla 3: Parámetros descriptivos para la determinación de la frecuencia de corte y la longitud | 28 |
| Tabla 4: Dimensiones de las geometrías | 62 |
| Tabla 5: Propiedades de los tallos de tabaco..... | 63 |
| Tabla 6: Dimensión de los parámetros para la determinación de la longitud de onda..... | 73 |
| Tabla 7: Dimensiones de las geometrías de caso 1 | 74 |
| Tabla 8: Geometrías del caso 1 | 74 |
| Tabla 9: Distribuciones de campo eléctrico para caso 1 en HFSS – ANSYS Electronics..... | 80 |
| Tabla 10: Distribuciones de temperatura en simulación de caso 1 para volumen y superficie externa, y validación experimental con cámara termográfica..... | 86 |
| Tabla 11: Dimensiones de las geometrías del caso 2..... | 88 |
| Tabla 12: Distribuciones de campo eléctrico para caso 2 en HFSS – ANSYS Electronics... | 92 |
| Tabla 13: Distribuciones de temperatura para caso 2 en simulación con volumen y superficie externa en elementos tras 90 s..... | 100 |
| Tabla 14: Dimensiones de las geometrías de caso 3 | 101 |
| Tabla 15: Distribuciones de campo eléctrico para caso 3 en HFSS – ANSYS Electronics. | 106 |
| Tabla 16: Distribuciones de temperatura para caso 3 en simulación con volumen y superficie externa en elementos tras 90 s..... | 114 |
| Tabla 17: Resumen energético para muestra en los casos hasta 90 segundos | 115 |



Lista de imágenes

| | |
|--|----|
| Figura 1: Banda completa del espectro electromagnético | 18 |
| Figura 2: Generación de una onda electromagnética | 22 |
| Figura 3: Sistema de calentamiento convencional y por microondas..... | 23 |
| Figura 4: Componentes principales del horno microondas LG MH6535GIS | 24 |
| Figura 5: Componentes y flujo de energía en un sistema de calentamiento por microondas . | 25 |
| Figura 6: Magnetron EAS61382908 del horno microondas LG MH6535GIS..... | 26 |
| Figura 7: Geometría de una guía de onda rectangular | 27 |
| Figura 8: Proceso iterativo adaptativo de ANSYS HFSS | 34 |
| Figura 9: Interfaz de ANSYS HFSS | 35 |
| Figura 10: Panel descriptivo de la estructura del proyecto | 35 |
| Figura 11: Administrador de mensajes del proyecto en ejecución | 36 |
| Figura 12: Cuadro de propiedades de los atributos del modelo..... | 36 |
| Figura 13: Cuadro de propiedades de los comandos del modelo..... | 37 |
| Figura 14: Ventana de proporción de avance | 37 |
| Figura 15: Panel de modelado 3D..... | 37 |
| Figura 16: Esquema del modelado computacional | 38 |
| Figura 17: Ventana de los tipos de solución admisibles | 39 |
| Figura 18: Panel del modelador 3D con sus secciones principales | 40 |
| Figura 19: Sistema de coordenadas global (izquierda) y relativo (derecha)..... | 40 |
| Figura 20: Guía para asignar una frontera al modelo | 41 |
| Figura 21: Parámetros ajustables de conductividad finita | 42 |
| Figura 22: Distribución de conductividad finita en el modelo | 43 |
| Figura 23: Guía para asignar una excitación al modelo..... | 43 |
| Figura 24: Parámetros ajustables del puerto de onda..... | 45 |
| Figura 25: Representación de la vista y orientación del puerto de onda | 45 |
| Figura 26: Panel de solución del proyecto – Sección convergencia..... | 46 |
| Figura 27: Ventana de los parámetros de la configuración de solución | 47 |
| Figura 28: Panel de los indicadores del barrido de frecuencia | 47 |
| Figura 29: Representación transversal del campo eléctrico del modelo en Mag E | 48 |
| Figura 30: Representación transversal del campo eléctrico del modelo en Vector E..... | 49 |
| Figura 31: Representación del mallado del modelo..... | 49 |
| Figura 32: Diagrama de flujo de simulación con malla adaptativa | 50 |
| Figura 33: | 51 |
| Figura 34: Mallado, condiciones de frontera y superficie y volumen de objeto a analizar | 51 |
| Figura 35: Condiciones de frontera y superficie y volumen de objeto a analizar..... | 52 |
| Figura 36: Interfaz de ANSYS Icepak | 52 |
| Figura 37: Tipo de solución | 53 |
| Figura 38: Configuración del análisis térmico transitorio | 53 |
| Figura 39: Verificación de buena configuración | 53 |
| Figura 40: Ploteo de distribución de temperatura | 54 |
| Figura 41: Tabulación de los resultados de temperatura | 54 |
| Figura 42: Geometría del extractor con microondas construido..... | 56 |
| Figura 43: Distribución planar de la simulación de campo eléctrico en la cámara de calentamiento con microondas para el prototipo construido..... | 56 |
| Figura 44: Geometría del artículo en HFSS | 57 |
| Figura 45: Selección del material aire | 57 |
| Figura 46: Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa sin considerar entradas..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 47: Asignación de puertos de entrada..... | 58 |
| Figura 48: Asignación de entradas con potencias de 1 kW por cada magnetron | 58 |
| Figura 49: Configuración de solución adaptativa del software | 59 |
| Figura 50: Configuración de barrido de frecuencias..... | 59 |
| Figura 51: Mallado y número de elementos para la cavidad | 59 |
| Figura 52: Distribución planar de la simulación de campo eléctrico planos XY, XZ y YZ para prototipo de artículo en ANSYS Electronics | 60 |
| Figura 53: Geometría del sistema de microondas para tratamiento de la biomasa de tallos de tabaco | 62 |
| Figura 54: Mallado de las geometrías | 63 |
| Figura 55: Curvas de temperatura tras simulación y experimentación..... | 64 |
| Figura 56: Distribución de campo eléctrico y temperatura tras simulación y validación experimental..... | 65 |
| Figura 57: Geometría del artículo en HFSS | 65 |
| Figura 58: Selección del material aire y sus propiedades | 66 |
| Figura 59: Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa sin considerar entradas..... | 66 |
| Figura 60: Configuración de condición de frontera de material metálico no magnético acero inoxidable..... | 67 |
| Figura 61: Asignación de entradas con potencias de 250 W por cada magnetron..... | 67 |
| Figura 62: Asignación de puertos de entrada..... | 67 |
| Figura 63: Configuración de solución adaptativa con frecuencia de operación | 68 |
| Figura 64: Configuración del barrido de frecuencias..... | 68 |
| Figura 65: Mallado para cavidad y muestra de tallo de tabaco..... | 69 |
| Figura 66: Número de elementos en mallado para cavidad y muestra | 69 |
| Figura 67: Distribución planar de la simulación de campo eléctrico planos XY, XZ y YZ para prototipo de artículo en ANSYS Electronics | 70 |
| Figura 68: Distribución de campo eléctrico en plano XZ y vectorial para muestra de tabaco en HFSS - ANSYS Electronics..... | 70 |
| Figura 69: Resultados de temperatura en muestra de tabaco tras 120 s a 500 W y 2.45 GHz. | 71 |
| Figura 70: Resultados de temperatura promedio en tabaco tras 120 s a 500, 1000 y 1500 W..... | 71 |
| Figura 71: Resultados de temperatura promedio en tabaco tras 120 s a 500, 1000 y 1500 W..... | 72 |
| Figura 72: Distribución de temperatura en muestra de tabaco tras 360 s a 500 W..... | 72 |
| Figura 73: Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa para caso 1..... | 75 |
| Figura 74: Configuración de condición de frontera de material metálico no magnético acero inoxidable con espesor para caso 1 | 75 |
| Figura 75: Asignación de puertos de entrada para caso 1 | 76 |
| Figura 76: Asignación de entrada con potencia de 1000 W..... | 76 |
| Figura 77: Configuración de solución adaptativa del software con frecuencia de operación para caso 1..... | 77 |
| Figura 78: Configuración del barrido de frecuencias..... | 77 |
| Figura 79: Mallado para cavidad y muestra de papa en caso 1..... | 77 |
| Figura 80: Número de elementos en mallado para cavidad y muestra de papa en caso 1 | 78 |
| Figura 81: Distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ de elementos para caso 1 en HFSS - ANSYS Electronics | 78 |
| Figura 82: Resultados de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 1 | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figura 83: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de muestra tras 150 s para caso 1 | 84 |
| Figura 84: Gráfica de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 1 | 85 |
| Figura 85: Gráfica de temperatura promedio en superficie externa de muestra tras 150 s para caso 1 | 85 |
| Figura 86: Geometrías del caso 2 | 88 |
| Figura 87: Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa para caso 2 | 89 |
| Figura 88: Asignación de puerto de salida para caso 2 | 89 |
| Figura 89: Mallado para cavidad y elementos en caso 2 | 90 |
| Figura 90: Número de elementos en mallado para caso 2 tras iteraciones | 90 |
| Figura 91: Distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ de elementos para caso 2 en HFSS - ANSYS Electronics | 91 |
| Figura 92: Resultados de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 2 | 96 |
| Figura 93: Resultados de temperatura promedio en volumen de cilindro para caso 2 | 96 |
| Figura 94: Resultados de temperatura promedio en volumen de esfera para caso 2 | 97 |
| Figura 95: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de muestra para caso 2 | 97 |
| Figura 96: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de cilindro para caso 2 | 98 |
| Figura 97: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de esfera para caso 2 | 98 |
| Figura 98: Gráfica de temperatura promedio en volumen de elementos tras 150 s para caso 2 | 99 |
| Figura 99: Gráfica de temperatura promedio en superficie externa de elementos tras 150 s para caso 2 | 99 |
| Figura 100: | 102 |
| Figura 101: Geometrías del caso 3 | 102 |
| Figura 102: Asignación de puerto de salida para caso 3 | 103 |
| Figura 103: Configuración de solución adaptativa del software con frecuencia de operación para caso 3 | 103 |
| Figura 104: Mallado para cavidad y elementos en caso 3 | 104 |
| Figura 105: Número de elementos en mallado para caso 3 tras iteraciones | 104 |
| Figura 106: Distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ de elementos para caso 3 en HFSS - ANSYS Electronics | 105 |
| Figura 107: Resultados de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 3 | 110 |
| Figura 108: Resultados de temperatura promedio en volumen de cilindro para caso 3 tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz | 110 |
| Figura 109: Resultados de temperatura promedio en volumen de esfera para caso 3 tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz | 111 |
| Figura 110: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de muestra de papa tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz | 111 |
| Figura 111: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de cilindro tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz | 112 |
| Figura 112: Resultados de temperatura promedio en superficie externa de esfera tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz | 112 |
| Figura 113: Gráfica de temperatura promedio en volumen de elementos tras 150 s para caso 3 | 113 |

Figura 114: Gráfica de temperatura promedio en superficie externa de elementos tras 150 s para caso 3..... 113



Introducción

El proceso de deshidratación de frutas es una técnica esencial en la industria alimentaria, ya que permite prolongar la vida útil de los productos conservando sus propiedades nutricionales. Sin embargo, los métodos tradicionales presentan limitaciones en cuanto a eficiencia energética y uniformidad del secado. Por consiguiente, se plantean modificaciones basadas en la deshidratación por microondas, orientadas a optimizar este tipo de secado.

Este trabajo aborda es la evaluación e innovación de una cavidad resonante para sistemas de microondas comerciales, con la finalidad que se pueda integrar un sistema de extracción de vapor. Para ello, se emplearon dos componentes de la herramienta de simulación ANSYS: HFSS y Icepak. El primero de ellos centrado en el análisis electromagnético y el otro centrado en el análisis térmico de la cavidad y la muestra. En la fase experimental, comparativa y validable se hizo uso del modelo LG MH6536GIS generando una alternativa diferente al secado convencional. De esta manera, se busca mejorar el proceso de deshidratación mediante el análisis teórico, simulaciones computacionales y validaciones experimentales, estableciendo bases para futuras innovaciones en la tecnología alimentaria.

El presente trabajo de investigación se estructura en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se presenta el estado del arte y los fundamentos teóricos del proyecto, mostrando datos actuales de los avances en las investigaciones vinculadas a la deshidratación de alimentos en la Universidad de Piura. Asimismo, se describen las ecuaciones que gobiernan el análisis computacional del Simulador de Estructuras de Alta Frecuencia (HFSS) y se detalla la tecnología de los hornos microondas. El segundo capítulo aborda un manual descriptivo y funcional de ambos componentes del simulador buscando facilitar futuras investigaciones. Seguido a ello, en el tercer capítulo se valida el software mediante simulaciones basadas en estudios científicos. El cuarto capítulo presenta casos prácticos de simulación, evaluando la interacción entre objetos y el campo electromagnético. Finalmente, se presentan las conclusiones que consolidan los hallazgos más resaltantes obtenidos a lo largo de la investigación.

Capítulo 1

Estado del arte y fundamentos teóricos

1.1 Marco histórico y estudios realizados

La deshidratación de alimentos ha sido uno de los métodos más efectivos para garantizar su conservación desde la era paleolítica, en la que los comestibles se secaban al sol con la finalidad de extender su tiempo de vida útil gracias a la evaporación del contenido de agua, lo que impedía la descomposición y propagación de agentes microbiológicos. De manera que, ello proveía de suministros para la sobrevivencia de los seres humanos en tiempos de escasez (Gacitúa, 2018).

Tras años de avances en las tecnologías de deshidratado, se aprecia la clasificación de cuatro generaciones. La primera con técnicas antiguas tal como secado al sol, ahumado, secado en lecho fluidizado¹, y por convección forzada donde se utilizan fluidos calientes para extraer el agua a partir de un calentamiento de los alimentos. Luego, la segunda generación basada en el secado por atomización y secado con tambores rotativos especialmente para producir productos en polvos. En cuanto a la tercera, se intenta no dañar la estructura de los alimentos y evitar perder las características de estos con técnicas como liofilización que congela y sublima el agua de los productos, y deshidratación osmótica. Finalmente, se ha alcanzado la cuarta generación que aprovecha el estudio de las propiedades fisicoquímicas para evaporar el agua a partir de la agitación de sus moléculas con microondas, lo que es más efectivo en comparación del uso de fluidos calientes (Gacitúa, 2018).

Para este estudio se ha considerado presentar algunas de las investigaciones con mayor relevancia en el área de deshidratación con microondas. En 2015, se realizó una publicación que consistía en deshidratar rebanadas de manzana a una frecuencia de 2450 MHz con potencias de 200, 400 y 600 W. De ahí que, los resultados revelaron que aplicar una potencia de 600 W con tiempo aproximado de 5 minutos era superior en aproximadamente un 37% de eficiencia energética respecto de usar una potencia de 200 W durante 25 minutos. Asimismo, la humedad final alcanzada fue casi igual para ambos experimentos, lo que resalta la efectividad para optimizar los tiempos de deshidratación (Zarein, Hashem Samadi, & Ghobadian, 2015).

La tecnología de microondas ya se ha desarrollado a nivel internacional en el área de la deshidratación de alimentos para conservar su calidad y extender su vida útil, sin embargo, en Perú se han realizado pocas investigaciones para mejorar el deshidratado, lo que retrasa en gran medida el avance de las empresas alimenticias y agroexportadoras (Alberdi, 2023).

¹ Técnica de secado en la que se utiliza un flujo de aire caliente para suspender las partículas del material dentro de una cámara.

En 2011, se manifestó que la deshidratación con microondas por si sola o en combinación con otros métodos ha demostrado reducir de forma considerable los tiempos de secado de los alimentos. Sirva de ejemplo, emplear microondas en un espacio con baja presión, lo que implica la reducción de la temperatura de ebullición del agua que contienen los alimentos. De ahí que, se puede deshidratar los alimentos manteniendo los nutrientes con sensibilidad a la oxidación, los sabores, y las moléculas biológicamente activas saludables. Es así como, se consiguen productos deshidratados con un alto índice de calidad a pesar de un aparente gran consumo de energía eléctrica, es decir, posibles costos elevados. No obstante, estos son menores en comparación de otras formas de secado (Durance & Yaghmaee, 2011).

Posteriormente, en 2015, se realizaron modificaciones a un horno microondas doméstico con el objetivo de optimizar el proceso de deshidratación de ciertas frutas y verduras. Esto se evidenció en que operaba con una cámara giratoria, fabricada de polipropileno, y en condiciones de vacío gracias al uso de una bomba de vacío. De ahí, se evaluaron alimentos tales como plátanos, tomates y zanahorias en forma de rodajas ante niveles de potencia de 400, 700 y 1000 W, y presión de vacío aproximada de 4 kPa, lo que demostró por ejemplo mayor efectividad al disminuir el tiempo de entre 14 y 16 h con deshidratación por congelamiento a 20 minutos en deshidratación por aplicación de microondas en vacío. Para finalizar, se concluyó que aplicar una potencia de 1000 W con las condiciones de vacío fue lo ideal para garantizar uniformidad de calentamiento y alta calidad manifestada en la conservación de las propiedades naturales de los productos (Lemos, Mattar, Marsiaoli, & Borges, 2015).

En 2022, se desarrolló un microondas extractor de compuestos bioactivos en base a simulaciones de ondas y campos eléctricos generados en una cavidad resonante con variaciones en sus dimensiones, cambios en las posiciones de sus ondas de guía y dos magnetrones respectivamente. De modo que, ello permitió la construcción de este prototipo que redujo el tiempo de extracción del compuesto dimetoxiflavona² que duraba una hora con un extractor Soxhlet a dos minutos con la tecnología de microondas (Nisoa, y otros, 2022).

Finalmente, en 2023, se ha diseñado, simulado y validado experimentalmente un horno basado en tecnología de microondas con la finalidad de obtener bioenergía sostenible en forma de biomasa vegetal a partir del tratamiento electrotérmico de los residuos de tallos de tabaco con microondas. Para ello, se ha realizado un estudio de parámetros de diseño en la simulación que han permitido obtener un adecuado prototipo y un óptimo aprovechamiento de la energía de microondas evidenciado en una eficiencia promedio de 59.15 % (Li, y otros, 2023).

² Compuesto químico perteneciente a la familia de las flavonas, en este caso del jengibre negro. Conocido por sus propiedades antioxidantes y terapéuticas, y se extrae comúnmente de fuentes vegetales para aplicaciones farmacológicas y científicas.

1.2 Actualidad de la deshidratación en la Universidad de Piura

La deshidratación de alimentos en la Universidad de Piura (UDEP) ha sido una rama con suma investigación debido al impulso brindado por residir en una comunidad que en gran medida depende económicamente de su actividad agrícola. Es así como, idear formas de conservar la calidad y extender el tiempo de vida útil de los productos para su posterior comercialización ha fomentado que investigadores tales como el Dr. Ing. Daniel Marcelo ejecuten proyectos en tecnologías de deshidratación. Sirva de ejemplo, la creación de invernaderos que aprovechan el sol con circulación natural o con la mejora de una circulación forzada, la factibilidad de la descompresión instantánea controlada, y la transferencia de calor utilizando microondas.

Ahora bien, tras todo lo desarrollado en investigación de deshidratado de alimentos, la presente tesis tiene como finalidad realizar investigación utilizando la tecnología de microondas. Ello, con el propósito de aprovechar los beneficios de reducción de tiempo de secado, ahorro energético, conservación de calidad e ideal distribución de calor, lo que en principio se confirmaría en base a simulaciones realizadas en el programa ANSYS Electronics, específicamente en sus herramientas ANSYS HFSS y ANSYS Icepack. Posterior a ello, se plantea validar experimentalmente lo simulado.

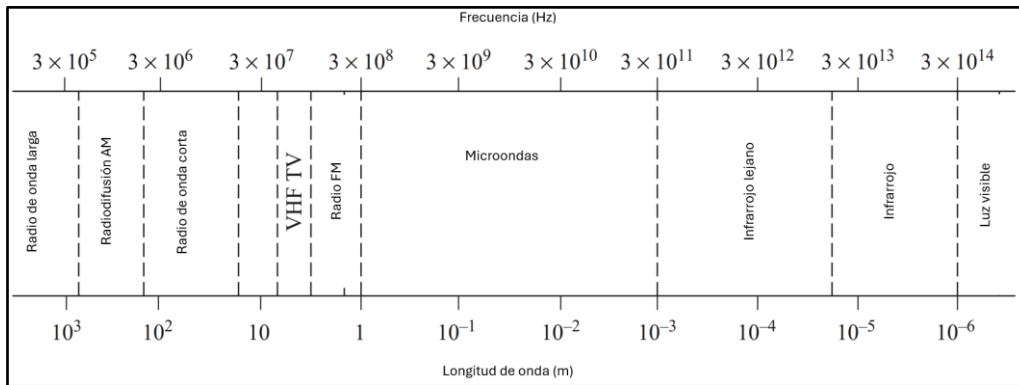
1.3 Fundamentos físicos y aplicaciones de las microondas

1.3.1 Principios de las ondas microondas en el espectro electromagnético

Las microondas son una forma de radiación electromagnética que implica una combinación de un campo eléctrico y uno magnético. Estas se propagan a través del espacio llevando consigo energía de un lugar a otro. Cabe mencionar que, ambos campos son perpendiculares entre sí y, a su vez, son perpendiculares a la dirección en la que se propaga la onda (Martinez, Díaz, & Becerra, 2022).

En el espectro electromagnético, las microondas abarcan un rango de frecuencias que oscila entre 0.3 GHz a 300 GHz, correspondiendo a longitudes de onda de 1 m a 1 mm respectivamente (Sorrentino & Bianchi, 2010). Se posicionan en el espectro electromagnético (EM), ubicado entre las frecuencias de las ondas de radio (RF) y las frecuencias infrarrojas (IR) (Clark & Folz, 1997). Lo mencionado se visualiza en la figura 1.

Figura 1:
Banda completa del espectro electromagnético



Nota. Tomado y traducido de Microwave Engineering (p.2), por (Pojar, 2012), Wiley.

La longitud de cada onda en un material se distingue por los parámetros que se pueden visualizar en la Tabla 1.

Tabla 1:
Parámetros de identificación de ondas electromagnéticas con sus respectivos símbolos y unidades

| Parámetros | Símbolos | Unidades de dimensionamiento |
|--------------------------|------------|------------------------------|
| Longitud de onda | λ | <i>m</i> |
| Frecuencia | <i>f</i> | <i>Hz</i> |
| Velocidad de propagación | <i>v</i> | <i>m/s</i> |
| Permeabilidad magnética | μ | <i>H/m</i> |
| Permitividad eléctrica | ϵ | <i>F/m</i> |

La longitud de onda se obtiene al dividir la velocidad de propagación entre la frecuencia. Siendo así, la expresión que las vincula la ecuación 1 (Stuart, 2015):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

La velocidad de propagación se puede calcular haciendo uso de la ecuación 2, que depende de las propiedades dieléctricas del material:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

Por lo tanto, la longitud de onda en un material queda definida como se muestra en la ecuación 3:

$$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3)$$

En el caso del vacío, la velocidad de propagación es igual a la velocidad de la luz (c). Dicho parámetro tiene un valor constante aproximadamente de 3×10^8 m/s. Es así como, la ecuación 1 equivale a lo visualizado en la ecuación 4:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

De la misma forma que la luz, las microondas exhiben la capacidad de ser reflejadas, transmitidas y/o absorbidas dependiendo del tipo de material con el que esté interactuando (Clark & Folz, 1997).

1.3.2 Interacción de materiales con microondas y calentamiento resultante

La temperatura de la materia brinda información sobre el comportamiento dinámico de las partículas, como las moléculas, átomos y electrones. Estas partículas pueden moverse de diferentes formas, tales como vibrando, girando o moviéndose de manera general. Este comportamiento se puede estudiar mediante la aplicación de las ondas electromagnéticas. En el caso de las microondas para calentar sustancias, se utilizan frecuencias entre 915 MHz y 2450 MHz. Este calor se genera porque las microondas hacen que las moléculas se alineen y giren (si son moléculas que tienen dos polos, como las de agua) o provocan un movimiento de iones en materiales iónicos (Pozar, 2012).

Cuando se trata de electrones libres, la interacción de estos con las microondas provoca desplazamientos y polarización por carga del espacio, manifestando el efecto de Maxwell – Wagner, que consiste en generar calor mediante colisiones. Un punto clave es la sincronización de la orientación de polarización con el campo; sin embargo, a frecuencias más altas, la inercia de moléculas y electrones provoca desfases que resultan en absorción de energía y calentamiento.

Al explorar la electricidad en cuerpos neutros, se experimenta que, las moléculas polarizadas en condiciones normales neutralizan las cargas. Pese a ello, la aplicación de campos eléctricos externos las orienta, y al presentar un cambio constante de polaridad inducen la rápida modificación de posiciones moleculares, generando calor por la vibración resultante (San Román, Castillo, Sotomayor, Gonzales, & Zenteno, 2018).

Es así como, para que un material sea capaz de calentarse al interactuar con las microondas, este debe ser polar, es decir, que esté conformado por moléculas que presentan cargas eléctricas opuestas en ambos extremos. El comportamiento de las moléculas polares se ve caracterizado por una rápida rotación y la generación de calor por fricción, liberándolo y transmitiéndolo desde el interior hacia el exterior. Un ejemplo de lo mencionado es el agua que al encontrarse dentro de la composición de todos los alimentos se logra su calentamiento mediante la interacción con microondas.

El agua es el componente principal de la mayoría de los alimentos. Por ello, para las pruebas experimentales de esta investigación se ha seleccionado la papa debido a su elevado contenido de agua, que constituye aproximadamente entre el 75% y el 80% de su peso

(Agropecuaria, 2004). Este alto porcentaje de agua permite una absorción eficaz de energía de microondas, debido a que las moléculas de agua son altamente polares.

Se señala que los materiales biológicos naturales, como los alimentos, solo absorben la parte eléctrica de la radiación electromagnética y no la energía del campo magnético (Ryynänen, 1995, como se citó en Metaxas & Meredith, 1983; Mudgett, 1986). Esto significa que la absorción de energía por parte de los alimentos se concentra en la interacción de las moléculas de agua con el campo eléctrico de las microondas. Cabe destacar que las propiedades dieléctricas de los materiales son fundamentales para la comprensión del rendimiento del calentamiento con microondas, además, describen su interacción con la parte eléctrica que absorben de la radiación electromagnética.

1.3.2.1 Características dieléctricas de los materiales. Las propiedades dieléctricas de los materiales son características eléctricas que definen cómo los materiales interactúan con los campos eléctricos. Estas no son constantes y pueden variar debido a diversos factores como la humedad del material, frecuencia del campo eléctrico, temperatura del material, densidad, composición química y la presencia de cargas móviles o dipolos permanentes (Stuart, 2015).

A continuación, se muestran en la tabla 2 las propiedades dieléctricas de los materiales.

Tabla 2:
Propiedades dieléctricas de los materiales para el estudio de ondas electromagnéticas

| Propiedad | Descripción | Expresión matemática | Unidades |
|---|--|---|----------|
| Permitividad compleja relativa (ϵ) | Describe el comportamiento de un material ante la interacción de campos eléctricos oscilantes. Su componente real representa la capacidad del material para almacenar energía eléctrica, mientras su componente imaginaria describe cuanta energía se disipa como calor. | $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (5)$ Donde: $\epsilon' = \text{constante dieléctrica}$ $\epsilon'' = \text{factor de pérdidas dieléctricas relativo}$ $j = \sqrt{-1} = \text{unidad imaginaria}$ | — |
| Tangente de pérdidas dieléctricas | Describe la cantidad de energía que pierde un material en forma de calor debido a la absorción de ondas electromagnéticas. | $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (6)$ Donde: $\epsilon' = \text{constante dieléctrica}$ $\epsilon'' = \text{factor de pérdidas dieléctricas relativo}$ | — |
| Profundidad de penetración | Indica hasta qué punto las ondas electromagnéticas penetran en un material antes de su pérdida significativa de energía. Esta medida es confiable con un margen de error mínimo (97-100%) cuando | $d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{\epsilon'\epsilon''}} \quad (7)$ Donde: $\lambda_0 = \text{longitud de onda en el vacío [m]}$ | m |

el factor de pérdida tan (δ)
es menor a 0.6.

Nota. Información tomada de The Electromagnetic Properties of Food Materials: A Review of the Basic Principles (p. 409-429), por (Ryynänen, 1995), Elseiver.

1.4 Fundamento de las ecuaciones de Maxwell en el campo electromagnético

En términos generales, los campos eléctricos y magnéticos se definen como magnitudes vectoriales que poseen tanto magnitud, dirección y sentido. Las relaciones y variaciones entre esos campos; así como, las cargas y corrientes vinculadas a las ondas electromagnéticas se rigen por las leyes físicas. Estas leyes fueron expresadas por James Clerk Maxwell, un físico y matemático escocés. La representación más utilizada para abordar problemas electromagnéticos con condiciones de contorno (variaciones de los vectores de campo a través de las fronteras relacionadas con las distribuciones discontinuas de cargas y corrientes) es la forma diferencial.

Este enfoque se emplea con carácter descriptivo y vinculativo entre los vectores de campo, las densidades de corriente, y densidades de carga con cualquier punto en el espacio en un instante aleatorio. Por lo tanto, para lograr una descripción integral de los vectores de campo en cualquier punto y momento es necesario considerar las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial y las condiciones de contorno. De manera diferencial, es posible expresar las ecuaciones de Maxwell como se observa desde la ecuación 8 hasta la 11:

$$\nabla \times \hat{E} = -\frac{\partial \hat{B}}{\partial t} - \hat{M} \quad (8)$$

$$\nabla \times \hat{H} = -\frac{\partial \hat{D}}{\partial t} - \hat{j} \quad (9)$$

$$\nabla \times \hat{D} = \rho \quad (10)$$

$$\nabla \times \hat{B} = 0 \quad (11)$$

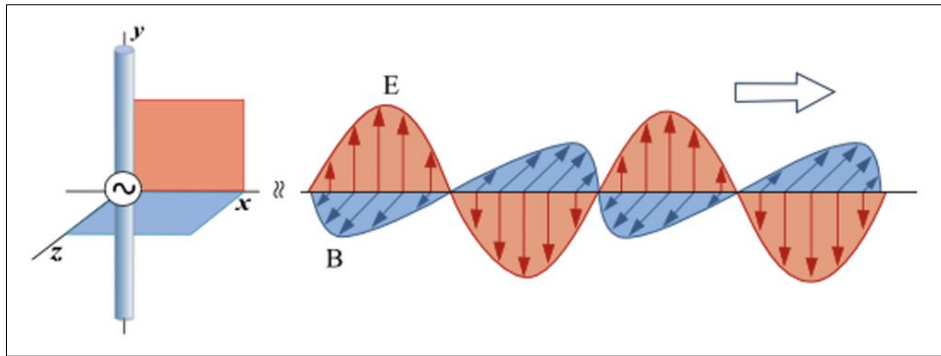
Donde \hat{E} representa la intensidad de campo eléctrico, en voltios por metro [V/m], \hat{H} simboliza la intensidad de campo magnético, en amperios por metro [A/m], \hat{D} es la densidad de flujo eléctrico, en culombios por metro cuadrado [C/m^2], \hat{B} indica la densidad de flujo magnético, en weber por metro cuadrado [Wb/m^2], \hat{j} alude a la densidad de corriente eléctrica, en amperios por metro cuadrado en [A/m^2], ρ denota la densidad de carga eléctrica, en culombios por metro cúbico [C/m^3] y \hat{M} connota a la densidad de corriente magnética, en voltios por metro cuadrado [V/m^2].

Las fuentes que generan el campo electromagnético son las corrientes \hat{M} y \hat{j} y la densidad de carga eléctrica ρ . Es importante destacar que, la corriente magnética \hat{M} es un valor ficticio en el sentido de que solo es una conveniencia matemática. Además, dado que la

corriente eléctrica representa el flujo de carga, se puede afirmar que la densidad de carga eléctrica ρ es la verdadera fuente del campo electromagnético (Poazar, 2012). En la figura 2 se puede apreciar la forma de propagación de una onda electromagnética.

Figura 2:

Generación de una onda electromagnética



Nota. Tomado de Teoría y Aplicaciones de Ingeniería de Microondas (p.21), por (San Román, Castillo, Sotomayor, Gonzales, & Zenteno, 2018).

La ecuación 5 representa la forma diferencial de la ley de Faraday, que aborda la inducción electromagnética de una fuerza electromotriz en un campo magnético variable en el tiempo. La ecuación 6 indica la forma matemática de la ley de Ampere, que relaciona un campo magnético constante con una corriente eléctrica invariante en el tiempo. La ecuación 7 alude a la ley de Gauss que describe cómo el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada está relacionado con la carga en el interior de esta. La convención del signo denota la dirección del campo eléctrico en relación con la carga. Por último, la ecuación 8 simboliza la ley de Gauss en carácter diferencial que expresa que las líneas de campo magnético son cerradas y no pueden comenzar ni terminar en cargas magnéticas aisladas, lo que da lugar a la inexistencia de monopolos magnéticos (San Román, Castillo, Sotomayor, Gonzales, & Zenteno, 2018).

Estas ecuaciones son fundamentales para entender cómo las ondas electromagnéticas se propagan y cómo interactúan con diferentes medios. En el contexto del calentamiento por microondas, las ecuaciones de Maxwell son una pieza fundamental para comprender la generación, transmisión y absorción de las microondas.

1.5 Mecanismos físicos de transferencia de calor

1.5.1 Calentamiento convencional

Cualquier forma tradicional de calentamiento implica siempre una transmisión de calor de un cuerpo con mayor temperatura a uno con una temperatura más baja. Esta transferencia térmica suele llevarse a cabo mediante tres tipos de mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación. Sin embargo, cada uno de ellos requiere de la presencia de una fuente de calor externa al cuerpo que se está calentando. En consecuencia, se establece un gradiente de temperatura en el cual las partes más externas o expuestas del cuerpo que se calientan tienen una temperatura superior a las demás secciones internas o con menor exposición. A medida que

transcurre el tiempo, la conducción que se desarrolla dentro del propio cuerpo tiende a eliminar ese gradiente logrando una homogenización de la temperatura (Menéndez & Moreno, 2017).

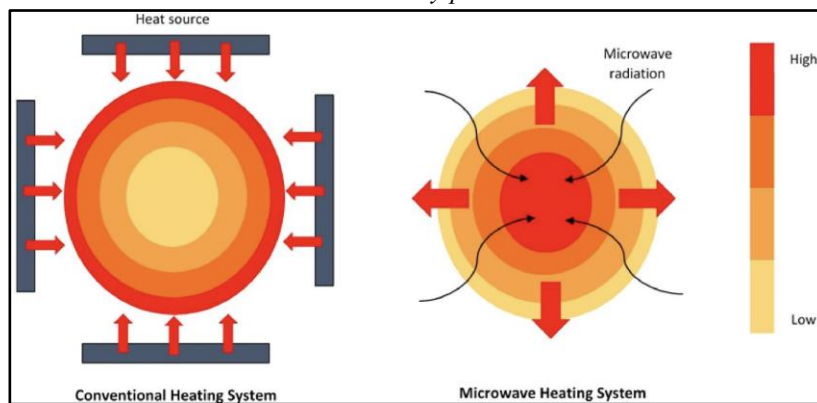
1.5.2 Calentamiento por microondas

Las ondas microondas transfieren energía de manera directa a las partículas dentro del cuerpo, dando lugar a un proceso de calentamiento interno. Este fenómeno se conoce como calentamiento volumétrico y consiste en que los campos eléctricos de las microondas que operan frecuencias elevadas provoquen una rotación alta de las moléculas de agua. De modo que, ello genera fricción entre las moléculas y en consecuencia calor evidenciado en el incremento de la temperatura desde el centro del alimento hasta la superficie de este. Es así como, al superar el punto de ebullición del agua, este líquido se extrae en forma de vapor (Rahman, Handoyo, & Prasetyo, 2020).

En contraste con el calentamiento convencional, en el que existe un gradiente de temperatura desde el exterior del alimento hasta su interior, el calentamiento por microondas es en sentido contrario. Por consiguiente, se logra que la temperatura se distribuya uniformemente a lo largo de todo el sistema y, además, se reducen los tiempos de calentamiento. En conjunto con todo lo mencionado, esta clasificación se vuelve altamente prometedora para su aplicación en diversos campos (Martinez, Díaz, & Becerra, 2022; Menéndez & Moreno, 2017). La figura 3 muestra una representación de los dos tipos de calentamiento comentados.

Figura 3:

Sistema de calentamiento convencional y por microondas



Nota. Tomado de Microwave-assisted Hydrothermal Carbonization for Solid Biofuel Application: A Brief Review, por (Muhammad , y otros, 2021), Elseiver.

1.6 Tecnología de los hornos microondas

1.6.1 Fundamentos operativos

El esquema eléctrico del horno microondas se compone de dos circuitos principales que están separados por el transformador de alto voltaje. Uno de ellos es el circuito de alto voltaje, el cual, está compuesto por el devanado secundario del transformador de alto voltaje, el magnetrón, el capacitor de alto voltaje y el diodo de alto voltaje. Por otro lado, se tiene el circuito de bajo voltaje que incluye el lado primario del transformador de alto voltaje, ventiladores, luces, interruptores, temporizador, motores, fusibles, termostatos y un

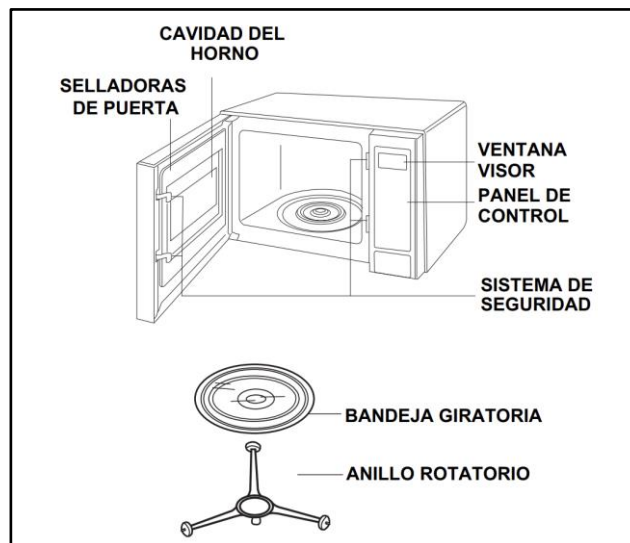
transformador de bajo voltaje que se encarga de controlar los componentes electrónicos en algunos ejemplares.

Una vez encendido el horno microondas la corriente continua se dirige hacia el magnetrón. Su salida produce energía de microondas desde la antena (2450 MHz) que se transmite a través de la guía de ondas. En ese punto, la energía no ionizante se direccionará hacia la paleta agitadora (no en todos los modelos). La paleta iniciará su movimiento logrando, dispersar las microondas a lo largo de toda la cavidad del horno (cavidad resonante) uniformemente. Seguido a ello, las microondas rebotarán en las paredes internas, el techo y el piso de la cavidad del horno, penetrando así los alimentos ubicados en el plato giratorio.

La preparación de los alimentos se logra a través de los tres métodos: conducción, convección y radiación. La energía proveniente de las microondas penetrará en los alimentos en un rango que oscila entre tres cuartos de pulgada y dos pulgadas. Ello dependerá de la densidad y de la proporción de agua presente en la comida. Al concluir el proceso de cocción, el horno se debe desconectar y el magnetrón cesará su funcionamiento (Kleinert, 2013). Para el desarrollo de este trabajo de investigación se ha hecho uso un microondas comercial LG modelo MH6535GIS. En la figura 4, se detallan los componentes principales del modelo escogido.

Figura 4:

Componentes principales del horno microondas LG MH6535GIS



Nota. Tomado de Horno de Microondas: Manual de instrucciones modelo MH6536GIS, por (LG, Horno de Microondas: Manual de instrucciones modelo MH6536GIS, 2017)

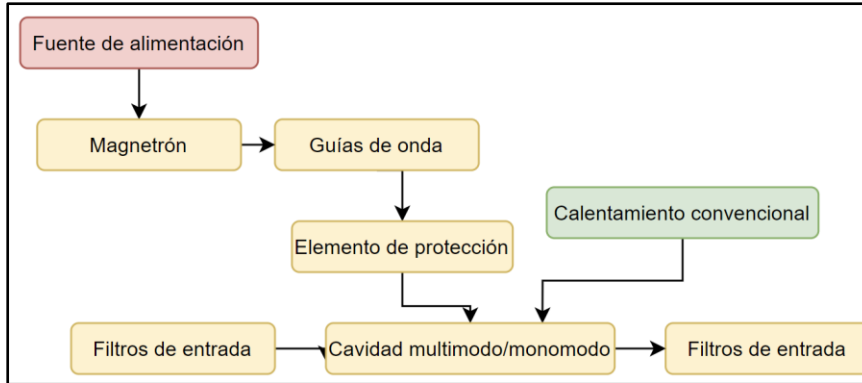
1.6.2 Dispositivos para calentamiento por microondas

El esquema básico de cualquier sistema de calentamiento por microondas consta inicialmente de una fuente de alimentación que permite transformar la corriente en voltajes y corrientes adecuados para el funcionamiento del magnetrón. En la figura 5 se muestra un

esquema que vincula los componentes de un horno microondas y el flujo de energía que se desarrolla entre ellos.

Figura 5:

Componentes y flujo de energía en un sistema de calentamiento por microondas



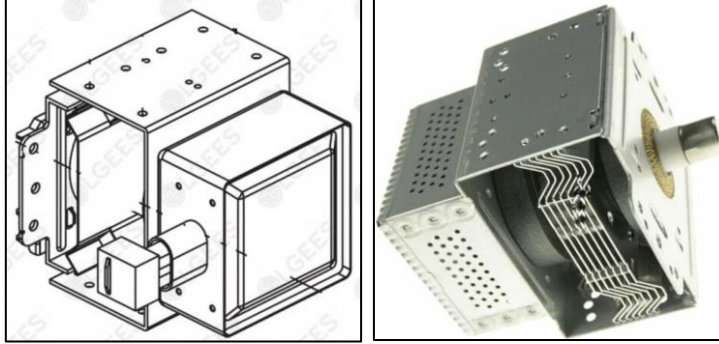
1.6.2.1 Magnetron. El magnetron, siendo un dispositivo electrónico de vacío que funciona como un diodo, presenta una estructura compuesta por un ánodo conformado por cavidades resonantes que rodean al cátodo. Este último, se calienta mediante corrientes que circulan a través de él, provocando la emisión de electrones hacia la cavidad interna. Por otro lado, el ánodo presenta cavidades que se proyectan radialmente y resuenan a la frecuencia de operación. Asimismo, puesto que todas las aberturas están interconectadas, la estructura en su conjunto se comporta como un circuito resonante.

Debido a la diferencia de potencial que existe entre ellos y en presencia de un voltaje mayor en el cátodo, los electrones tienden a dirigirse hacia él. No obstante, la presencia del campo magnético generado por el imán en la cavidad impide que la trayectoria sea directa, induciendo un movimiento giratorio de los electrones del cátodo hasta el ánodo. La energía que se deriva en este movimiento se asocia como energía de microondas en las cavidades debido a la generación de campos electromagnéticos como resultado del giro de los electrones. La extracción de la energía magnética se logra con la presencia de una antena, la cual, está conectada en una de las cavidades (Menéndez & Moreno, 2017; Las microondas en la industria, 1998). En la figura 6 se puede apreciar el magnetron que emplea el modelo de microondas elegido.

1.6.2.2 Guía de onda. Sistema conformado por conductores y/o dieléctricos con sección transversal uniforme en una dirección específica del espacio. Esta estructura es la encargada de dirigir o propagar las ondas electromagnéticas en su interior o en sus proximidades (San Román, Castillo, Sotomayor, Gonzales, & Zenteno, 2018).

Figura 6:

Magnetron EAS61382908 del horno microondas LG MH6535GIS



Nota. Tomado de Magnetron EAS61382908 para horno microondas LG MH6536GIS, por (LG, 2020)

1.6.2.2.1 Tipos de modos en una guía de ondas. Los modos representan las diferentes formas en que los campos eléctricos y magnéticos pueden distribuirse y propagarse a lo largo de la guía. Las ecuaciones de Maxwell descritas en la sección previa posibilitan la identificación de los modos de propagación existentes dependiendo del tipo de guía de onda que se trate. Las expresiones que fundamentan cada uno de los modos son las que se visualizan desde la ecuación 12 hasta las 15:

$$\nabla_t^2 H_z + (k^2 + \gamma^2)H_z = 0 \quad (12)$$

$$\nabla_t^2 E_z + (k^2 + \gamma^2)E_z = 0 \quad (13)$$

$$\vec{E}_t = \frac{1}{k^2 + \gamma^2} [jw\mu\hat{z} \times \vec{\nabla}_t H_z - \gamma \vec{\nabla}_t E_z] \quad (14)$$

$$\vec{H}_t = \frac{1}{k^2 + \gamma^2} [-jw\varepsilon\hat{z} \times \vec{\nabla}_t E_z - \gamma \vec{\nabla}_t H_z] \quad (15)$$

Donde H_z se define como el componente del campo magnético en el eje z [A/m], \vec{H}_t se relaciona como el campo magnético transversal [A/m], E_z representa es componente del campo eléctrico en el eje z [V/m], \vec{E}_t se vincula como el campo eléctrico transversal [V/m], w se connota como la frecuencia angular [rad/s], ∇_t^2 se expresa como el operador laplaciano en el plano transversal [$1/m^2$], k es el número de onda [$1/m$] y γ es el coeficiente de propagación [$1/m$].

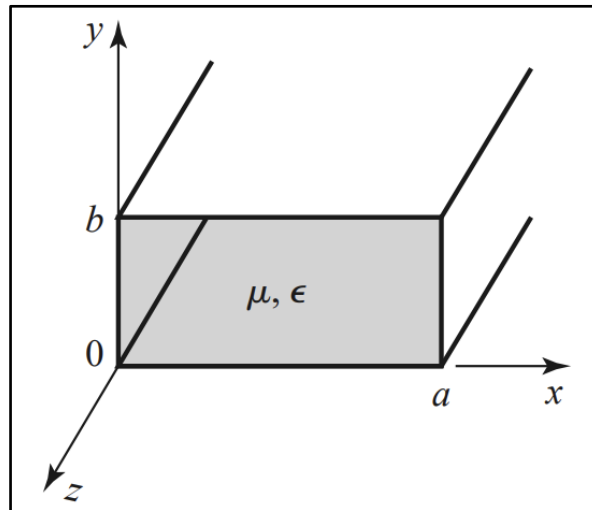
En primera instancia se encuentra el modo transversal electromagnético (TEM), este tipo de modo no posee componentes de campo en dirección z . Solo se posibilita su existencia si y solo si la guía de ondas está conformada por dos o más conductores. En segundo lugar, se ubica el modo transversal eléctrico (TE), esta clasificación no tiene componentes de campo en dirección z . A diferencia del modo TEM puede propagarse en guías de onda compuestas por un

solo conductor. Asimismo, se trabaja con el modo transversal magnético (TM) que carece de componentes de campo en dirección z. Se destaca que, su propagación puede habilitarse en una guía de ondas de un solo conductor. Por último, se tiene el modo híbrido, el cual, no posee componentes en la dirección z ni el campo eléctrico ni en el magnético (Delgado, 2013).

1.6.2.2.2 Guía de onda rectangular. Las guías de onda rectangulares son adecuadas para transportar potencias elevadas, esto las convierte en una elección común en la construcción de hornos microondas. Debido a esto, se estudiará a detalle este tipo de clasificación. Este tipo de guías son estructuras empleadas como medios de transmisión cuyo rango de trabajo se encuentra entre 1 GHz hasta un poco más de 200 GHz. Este tipo de guías tienen la capacidad de admitir modos de propagación TE y TM, excluyendo el modo TEM debido a su utilización de un solo conductor (Sorrentino & Bianchi, 2010).

Figura 7:

Geometría de una guía de onda rectangular



Nota. Tomado de Microwave Engineering (p.111), por (Pozar, 2012), Wiley.

De la definición previa se sabe que, para el modo Transversal Electromagnético (TE) la componente en z del campo eléctrico es nula, por lo cual, las ecuaciones 12 a la 15 quedan reducidas a lo siguiente:

$$(\nabla_t^2 + k_c^2)H_z = 0 \quad (16)$$

De la definición previa se sabe que, para el modo Transversal Magnético (TM) la componente en z del campo magnético es nula, por lo cual, las ecuaciones 12 a la 15 quedan reducidas a lo siguiente:

$$(\nabla_t^2 + k_c^2)E_z = 0 \quad (17)$$

Al resolver las ecuaciones 16 y 17, es posible obtener información sobre el interior de la guía, lo que permite determinar las componentes de los campos en la dirección z . Al realizar una generalización de ambas expresiones:

$$(\nabla_t^2 + k_c^2)\Psi(x, y) = 0 \quad (18)$$

Donde $\Psi(x, y)$ puede ser $E_z(x, y)$ o $H_z(x, y)$, según sea un modo TE o un modo TM. Es así como, la solución de la ecuación 18 para el modo TM queda definida por:

$$E_z(x, y) = E_{z0} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (19)$$

Y para el modo TE queda determinada por la ecuación 20, tal y como a continuación se muestra:

$$H_z(x, y) = H_{z0} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (20)$$

Las soluciones de campos se denotan a partir de las constantes m y n . El modo TE m_0n_0 / TM m_0n_0 denota la configuración de campos transversal eléctrica/magnética obtenida eligiendo $m = m_0$ y $n = n_0$. Y serán soluciones válidas para cualquier valor natural m y n , excepto $m = 0$ y $n = 0$ en el caso del modo TE, y cuando el $m = 0$ y/o $n = 0$ en el caso del modo TM (Sorrentino & Bianchi, 2010; Delgado, 2013).

En una guía de ondas rectangular, el modo dominante corresponde al modo TE₁₀ ($m = 1, n = 0$), dado que tiene la frecuencia de corte más baja. Ello hace que, sea el primer modo en propagarse cuando se encuentra en funcionamiento (Pozar, 2012). Dicha frecuencia de corte se efectúa a través de la ecuación 21:

$$f_{c10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (21)$$

Tabla 3:

Parámetros descriptivos para la determinación de la frecuencia de corte y la longitud

| Parámetros | Símbolos | Unidades de dimensionamiento |
|----------------------------|------------|------------------------------|
| Dimensión mayor de la guía | a | m |
| Permeabilidad magnética | μ | $\frac{H}{m}$ |
| Permitividad eléctrica | ϵ | $\frac{F}{m}$ |
| Constante de propagación | β | $\frac{1}{m}$ |
| Frecuencia de la onda | f | $\frac{1}{s}$ |

A medida que la frecuencia de operación incrementa, los otros modos de trabajo pueden propagarse; sin embargo, para aplicaciones típicas como los hornos microondas, se trabaja con el modo TE₁₀ con la finalidad de no introducir pérdidas adicionales como consecuencia de la dispersión de la energía (Pozar, 2012).

Otro parámetro necesario para su definición es su longitud que se define como la distancia que existe entre dos planos con la misma fase y está determinada por la ecuación 22:

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} \quad (22)$$

La constante de propagación (β) para este modo se calcula haciendo uso de la ecuación 23:

$$\beta = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (23)$$

Se detalla que, el número de onda en el medio (k) se establece a través de la ecuación 24:

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (24)$$

Por lo tanto, la longitud de onda en una guía de ondas rectangular expresada en la ecuación 22 queda definida como (Pozar, 2012):

$$\lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (25)$$

1.6.2.3 Cavidades de microondas. Espacio designado dentro del horno microondas para la ubicación de la muestra expuesta a radiación electromagnética. Es la principal responsable en dos aspectos cruciales del proceso de calentamiento por microondas: la absorción de energía para el calentamiento y la uniformidad en la distribución de temperatura en el material que está siendo calentado. Estas cavidades están elaboradas a partir de material con una alta conductividad eléctrica creando una especie de jaula de Faraday que limita la energía que producen las microondas en su interior (Cutillas, 2012).

1.6.2.3.1 Características de diseño. Para lograr un diseño ideal de la cavidad del horno microondas se deben satisfacer los siguientes requisitos:

- **Geometría eléctrica y física:** Las dimensiones geométricas deben ser lo suficientemente amplias para cumplir los requerimientos físicos del material que se va a calentar, al mismo tiempo, deben proporcionar una adaptación efectiva a las dimensiones eléctricas del mismo.

- **Aplicación industrial:** El diseño debe adaptarse para satisfacer las necesidades específicas según el tipo de aplicación que se le dé. Ello dependerá de si el horno microondas va a integrarse en un sistema de calentamiento continuo, que implica aberturas permanentes con filtros de contención, o si está destinado a un proceso por lotes, que implica el uso de puertas.
- **Termodinámica del material:** Se deben considerar las propiedades térmicas del material especialmente la conductividad térmica y el calor específico. Esto es importante si se esperan cambios de estado como: la evaporación, licuefacción, sublimación, entre otros, que podrían perturbar las características dieléctricas y conducir a calentamientos no lineales. También se debe prever el tratamiento adecuado de subproductos como: la contención o evacuación de gases, el control de la evaporación y la gestión de residuos derivados de procesos como pirólisis.
- **Eficiencia energética:** La eficiencia se mejora al reducir al mínimo las reflexiones y acoplamientos entre diversas fuentes de microondas.
- **Homogeneidad en el calentamiento:** Es fundamental procurar que la densidad volumétrica de absorción de energía sea lo más uniforme posible en el material, debido a que, ante la presencia de un calentamiento heterogéneo se generan tensiones mecánicas, las cuales pueden resultar en la formación de grietas o en la fractura del material.
- **Proporcionalidad en la potencia irradiada:** Las dimensiones con las que trabaje la cavidad deben ser adecuadas para el nivel de potencia que se pretende aplicar. Si se aplica una potencia elevada en una cavidad de dimensiones reducidas, existe el riesgo de que se produzcan arcos eléctricos. Esto podría deberse al provocarse una ruptura del dieléctrico interno, especialmente cuando se trata de aire a presión atmosférica (Menéndez & Moreno, 2017).

1.6.2.3.2 Cavidad resonante monomodo. Principalmente se utilizan para calentar pequeños materiales con bajas pérdidas, ya que, su reducido volumen produce intensidades de campo eléctrico elevadas. En este tipo de cavidades solo se manifiesta un modo resonante TE o TM, por lo que el campo eléctrico surge de la distribución espacial de este modo en particular (Cutillas, 2012). Es importante destacar que, para que se logre una absorción energética óptima, la muestra debe ubicarse cerca de un máximo de campo, y, para obtener una homogeneidad en el calentamiento, el entorno debe presentar un campo eléctrico o magnético uniformemente distribuido. Aunque es poco probable que se empleen estas cavidades en entornos industriales, no se profundizará en el detalle de estos diseños (Menéndez & Moreno, 2017).

1.6.2.3.3 Cavidad resonante multimodo. Un horno microondas comercial es una cavidad resonante multimodo donde la cámara debe tener diversas longitudes de onda en al menos dos dimensiones para tener muchos modos. De ahí que, los modos hacen referencia a ondas estacionarias resonantes entre paredes opuestas de la cavidad. El número de modos que soporta depende de las dimensiones de la cámara, la longitud de onda, y la forma en la que ingresan las microondas. Los modos van típicamente desde uno a seis, lo que corresponde a puntos calientes o fríos en el horno que indican un rápido o lento calentamiento en el espacio tridimensional. Asimismo, tener diferentes modos permite un trabajo eficiente con diferentes tipos de alimentos (Durance & Yaghmaee, 2011).

1.6.3.4 Filtros de contención. Este tipo de filtros se conocen como “filtros choke” y se fundamentan en la frecuencia de corte de las guías de onda. Evitan las emisiones no deseadas de radiación desde la cavidad de microondas hacia el entorno exterior garantizando la seguridad de la salud de las personas, asimismo eluden la superposición de interferencias con sistemas que operan en la misma banda de frecuencias. En el caso del horno microondas doméstico, se coloca un filtro alrededor de la puerta de acceso a la sección interna de la cavidad empleada para la carga y descarga de las muestras (Aguilar, 2001).

1.7 Análisis energético en productos expuestos a microondas

En esta sección se determinará el porcentaje de absorción de energía de microondas en forma de energía térmica para un alimento mediante un análisis energético con las siguientes ecuaciones:

Cantidad de calor (Q), es decir, energía térmica para generar un cambio de temperatura se expresa como se observa en la ecuación 26:

$$Q = C_e m \Delta T \text{ [J]} \quad (26)$$

Donde:

C_e : Calor específico del material $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$

m : Masa del material [kg]

ΔT : Variación de temperatura en el material [$^\circ\text{C}$]

Cantidad de energía (E) suministrada en el tiempo, en este caso por las microondas se define como se visualiza en la ecuación 27:

$$E = P \Delta t \text{ [J]} \quad (27)$$

Donde:

P : Potencia de operación el horno microondas [W]

Δt : tiempo de operación del microondas [$^\circ\text{C}$]

Es así como, el porcentaje de absorción de energía para una muestra en un horno microondas se determina por la ecuación 28:

$$A = \frac{Q}{E} \times 100 \text{ [%]} \quad (28)$$

1.8 Métricas para evaluar precisión de un modelo

Para este estudio se utilizarán dos métricas para determinar la precisión de los modelos simulados respecto de algunos casos de validación tal como se realiza en la investigación de (Li, y otros, 2023).

La raíz error cuadrático medio que debe ser lo más cercano a cero tras aplicar la ecuación 29:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_s - T_m)^2} \quad (29)$$

El error relativo máximo calculado de la ecuación 30:

$$E_{i,máx} = \max \left(\frac{|T_s - T_m|}{T_m} \times 100\% \right) \quad (30)$$

Donde:

T_s : Temperatura simulada [°C]

T_m : Temperatura medida de referencia [°C]



Capítulo 2

Uso de ANSYS Electronics en la simulación de ondas electromagnéticas

En el presente capítulo se detallará el uso de ANSYS Electronics, una plataforma de simulación multifísica que reúne diversas herramientas especializadas para el análisis de fenómenos electromagnéticos, térmicos y mecánicos, tanto en bajas como en altas frecuencias.

Los módulos descritos a continuación son ANSYS HFSS cuyas siglas corresponden a High Frequency Structure Simulator traducido al español como Simulador de Estructuras en Alta Frecuencia, que es utilizado para la simulación y análisis electromagnético en dispositivos de alta frecuencia y ANSYS Icepak, que es empleado para la simulación y análisis térmico. En conjunto permiten un análisis integrado tanto de los efectos electromagnéticos como de los térmicos sobre elementos de estudio con una evaluación precisa de su desempeño y fiabilidad.

2.1 Método matemático de solución utilizado en ANSYS HFSS

La técnica numérica utilizada en HFSS es el Método de Elementos Finitos (FEM). Este método consiste en subdividir una estructura en pequeñas secciones denominadas elementos finitos, que en este caso tienen forma de tetraedros y conforman una malla. Se calcula la solución de los campos dentro de estos tetraedros, los cuales están interrelacionados de manera que satisfacen las ecuaciones de Maxwell en las condiciones de frontera entre los elementos, permitiendo obtener una solución de campo para toda la estructura original.

Este software se centra en campos eléctricos y magnéticos. Los parámetros electromagnéticos restantes se derivan haciendo uso de relaciones constitutivas. Matemáticamente, HFSS soluciona el campo eléctrico (E) empleando la ecuación 31:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon_r E = 0 \quad (31)$$

En esta expresión, E es el campo eléctrico [V/m] y los términos μ_r y ϵ_r , representan la permeabilidad $[-]$ y la permitividad $[-]$ relativas del material. El parámetro k_0 es el número de onda en el vacío [rad/m], dado por la ecuación 32:

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (32)$$

Donde ω es la frecuencia angular de la onda electromagnética, μ_0 es la permeabilidad del vacío [H/m] y, por último, ϵ_0 es la permitividad del vacío [F/m]. Para el campo magnético (H) se hace uso de la ecuación 33:

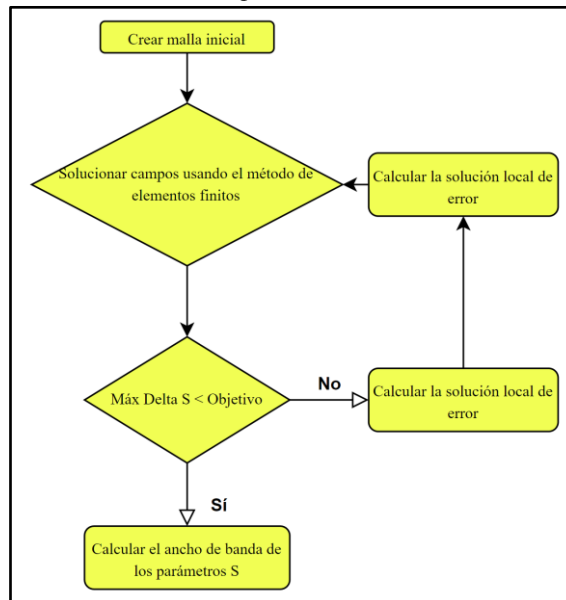
$$H = \frac{J}{j\omega\mu} \nabla \times E \quad (33)$$

En esta expresión, H se expresa como el campo magnético [A/m], J representa la densidad de corriente eléctrica [A/m^2], j es la unidad imaginaria [$-$] y μ es la permeabilidad del material [H/m] (ANSYS, 2013).

2.2 Proceso de Solución Adaptativa en HFSS

El proceso de solución adaptativa garantiza la precisión en la resolución de problemas electromagnéticos. A través de un método automatizado de refinamiento de mallas, HFSS ajusta de manera iterativa la malla utilizada en la simulación mejorando la exactitud de los resultados y optimizando el tiempo de configuración del diseño. Se puede visualizar en la figura 8 un esquema que sintetiza el proceso iterativo adaptativo que ajusta automáticamente ANSYS.

Figura 8:
Proceso iterativo adaptativo de ANSYS HFSS

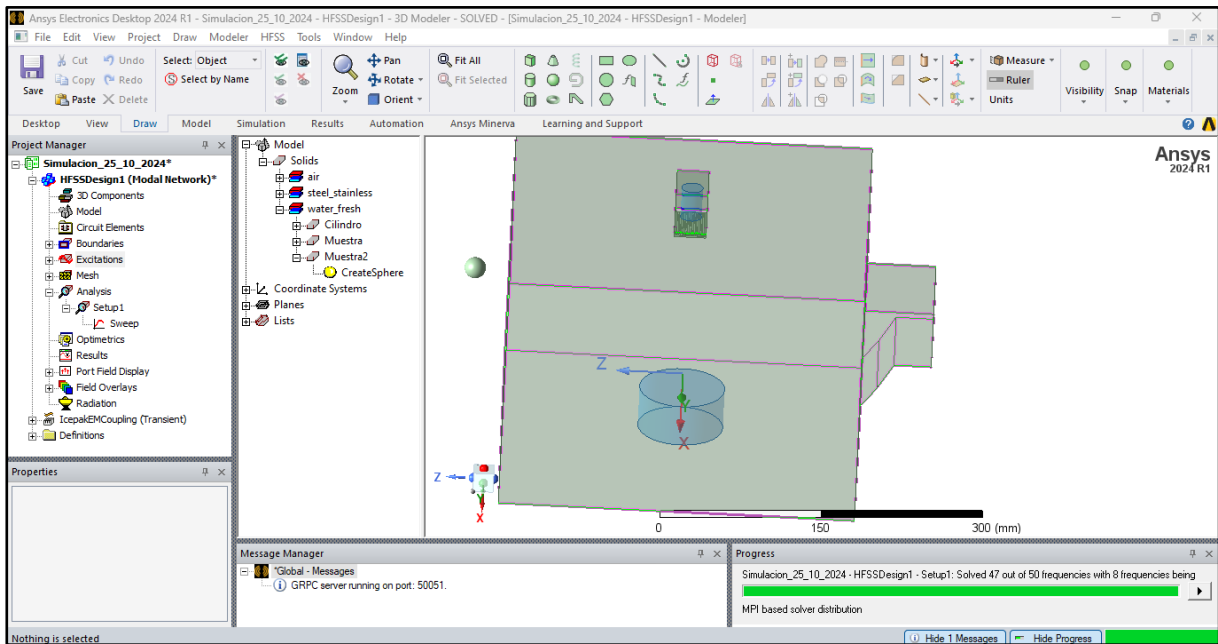


El refinamiento de la malla se localiza en regiones donde el error en la solución del campo eléctrico es elevado. Una vez identificada la zona, los tetraedros se refinan creando un número de tetraedros más pequeños reemplazando al original. La adaptabilidad de este proceso es clave para alcanzar soluciones convergentes, las cuales se definen mediante el monitoreo de los parámetros en cada una de las iteraciones (ANSYS, 2005).

2.3 Interfaz de usuario de ANSYS HFSS

La ventana principal de ANSYS HFSS ofrece una interfaz intuitiva que incluye varios paneles diseñados para facilitar el uso de software. A continuación, se describirán los más relevantes y frecuentemente usados en el desarrollo de los casos de estudio evaluados en esta investigación (ANSYS, 2013). En la figura 9 se ha ajustado una representación de la interfaz de usuario.

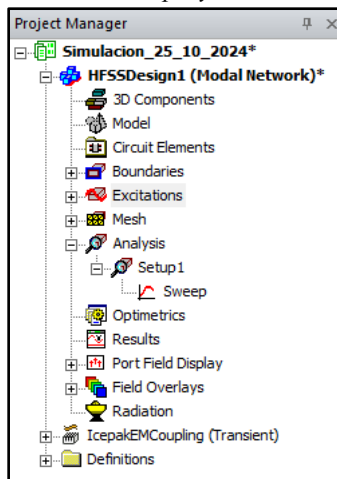
Figura 9:
Interfaz de ANSYS HFSS



2.3.1 Gestor de proyectos

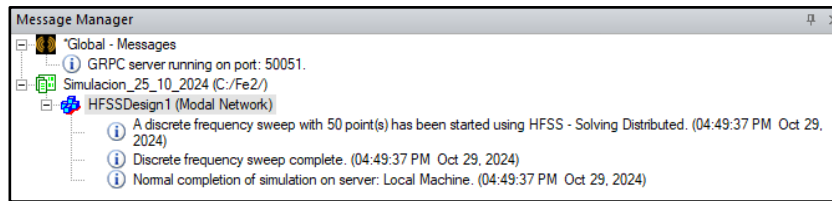
Este panel está compuesto por un árbol de diseño que detalla la estructura del proyecto, facilitando un acceso rápido y organizando todos los componentes del modelo (ANSYS, 2013). En la figura 10 se ha ajustado una representación del gestor de proyectos.

Figura10:
Panel descriptivo de la estructura del proyecto



2.3.2 Gestor de mensajes

Este panel proporciona una visualización de cualquier error, advertencia o resultado que pueda surgir antes o después de ejecutar la simulación permitiendo una previa o posterior modificación en diseño (ANSYS, 2013). Se ha ajustado una representación de este panel en la figura 11.

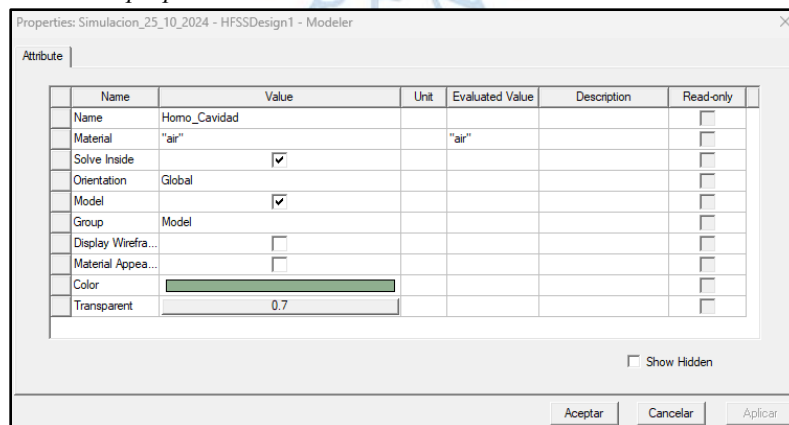
Figura 11:*Administrador de mensajes del proyecto en ejecución*

2.3.3 Ventana de propiedades

En este panel se puede observar y ajustar los parámetros y atributos del modelo, lo que garantiza un control total de la simulación.

2.3.3.1 Atributos. Los atributos de un objeto definen varias propiedades personalizables (ANSYS, 2013). En la figura 12 se ha ajustado una representación de la ventana de propiedades de los atributos del modelo.

- Nombre: Definido por el usuario. Se define Box1 por defecto.
- Material: Definido por el usuario. Se define por defecto “vacío”.
- Resolver dentro: En HFSS, el software por defecto resuelve los campos electromagnéticos dentro de materiales dieléctricos. Cuando se trabaja con materiales conductores, se debe marcar la casilla “Solve Inside”.
- Orientación: Esta opción permite decidir si un objeto específico se incluirá en el modelo de resolución del campo electromagnético.
- Visualización en wireframe: La visualización en "wireframe" permite que el objeto se muestre siempre en un formato de líneas o estructura de alambre, en lugar de como un sólido opaco.
- Color: Determina el color del objeto.
- Transparencia: Define la transparencia del modelo.

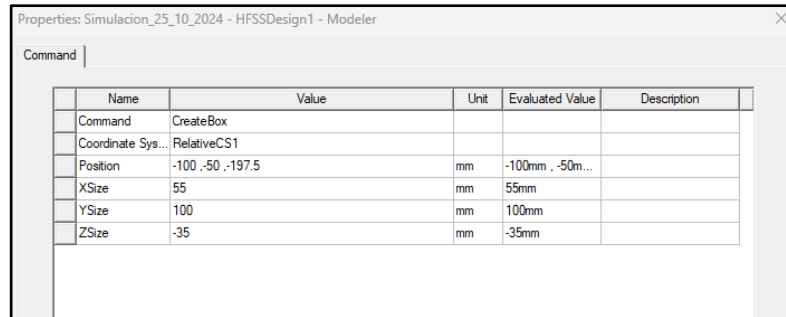
Figura 12:*Cuadro de propiedades de los atributos del modelo*

2.3.3.2 Comandos. Los comandos de un objeto definen propiedades que permiten definir una o varias variables en lugar de una posición o tamaño fijo. Ellas pueden ser de uso

para el modelo o globales para todos los modelos del proyecto (ANSYS, 2013). En la figura 13 se ha ajustado una representación de la ventana de propiedades de los comandos del modelo.

Figura 13:

Cuadro de propiedades de los comandos del modelo



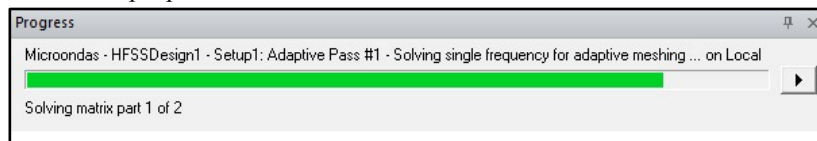
| Name | Value | Unit | Evaluated Value | Description |
|-------------------|-------------------|------|-----------------|-------------|
| Command | CreateBox | | | |
| Coordinate Sys... | RelativeCS1 | | | |
| Position | -100, -50, -197.5 | mm | -100mm, -50m... | |
| XSize | 55 | mm | 55mm | |
| YSize | 100 | mm | 100mm | |
| ZSize | -35 | mm | -35mm | |

2.3.4 Ventana de progreso

En panel de progreso se muestra el avance de la solución durante el proceso de simulación en tiempo real sobre el estado de ejecución del diseño. Con ello, se monitorea el rendimiento de la simulación y se puede anticipar su finalización (ANSYS, 2013). En la figura 14 se ha ajustado una representación de la ventana de avance sobre la ejecución de la simulación.

Figura 14:

Ventana de proporción de avance

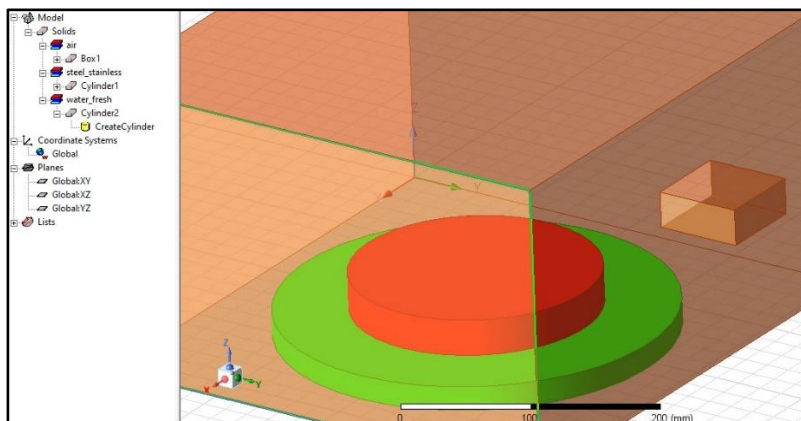


2.3.5 Ventana del modelador 3D

El panel del modelador 3D alberga el modelo tridimensional y el árbol de modelo correspondiente al diseño activo en edición. En la figura 15 se ha ajustado una representación de la ventana del modelador 3D.

Figura 15:

Panel de modelado 3D



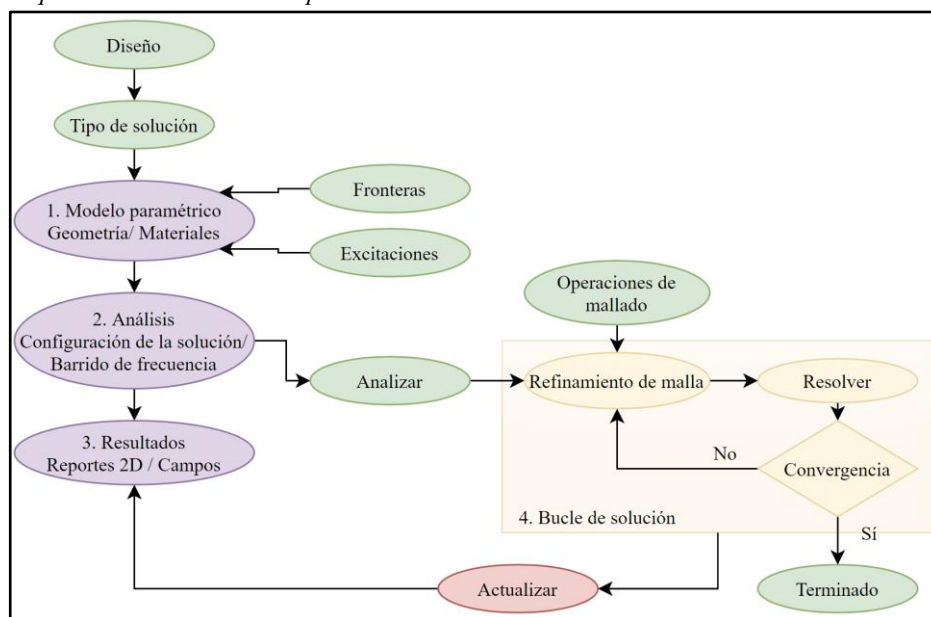
2.4 Proceso de Simulación en ANSYS HFSS

El proceso de simulación implica cuatro secciones que se detallan a continuación:

- Generación de modelos paramétricos: En esta área se genera o se importa el modelo físico del caso de estudio proporcionándole características propias. Posterior a ello, se asignan las fronteras y excitaciones
- Configuración del análisis: En esta sección se configura la solución, donde se seleccionará la frecuencia de solución, los criterios de convergencia, el número de pasos adaptativos, metodología a emplear y por último qué tipo de barrido de frecuencia utilizar.
- Resultados: Culminada la solución se puede optar por postprocesar los resultados gráfica o cuantitativamente.
- Bucle de solución: El proceso de solución está completamente automatizado (Proceso de Solución Adaptativa en HFSS) (ANSYS, 2005).

En la figura 16 se ha ilustrado un esquema con la finalidad de comprender como estos procesos se interconectan.

Figura 16:
Esquema del modelado computacional

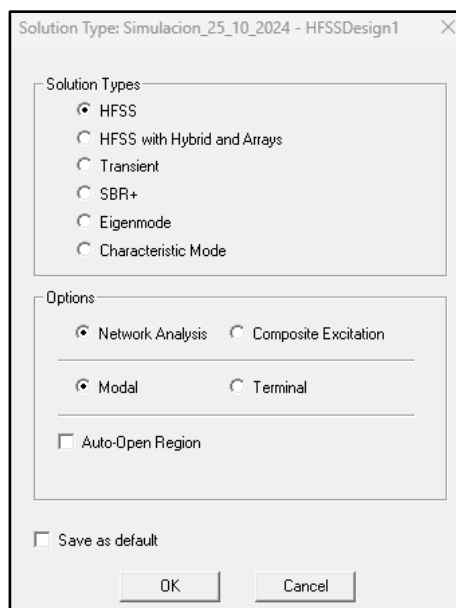


2.4.1 Tipos de solución

El tipo de solución se puede seleccionar haciendo clic en HFSS en la barra de menú principal, seleccionando el tipo de solución, y eligiendo el tipo deseado del menú. La elección del tipo puede variar entre tres opciones principales que permiten modelar diferentes escenarios y obtener resultados específicos según las características del sistema que se desea analizar.

- Modal excitado (Driven Modal): Esta clasificación calcula los parámetros S en función de los modos. Los resultados se representan en términos de potencia incidente y reflejada de los modos de la guía de ondas. Para el desarrollo de esta investigación se ha hecho uso de modalidad.

Figura 17:
Ventana de los tipos de solución
admisibles



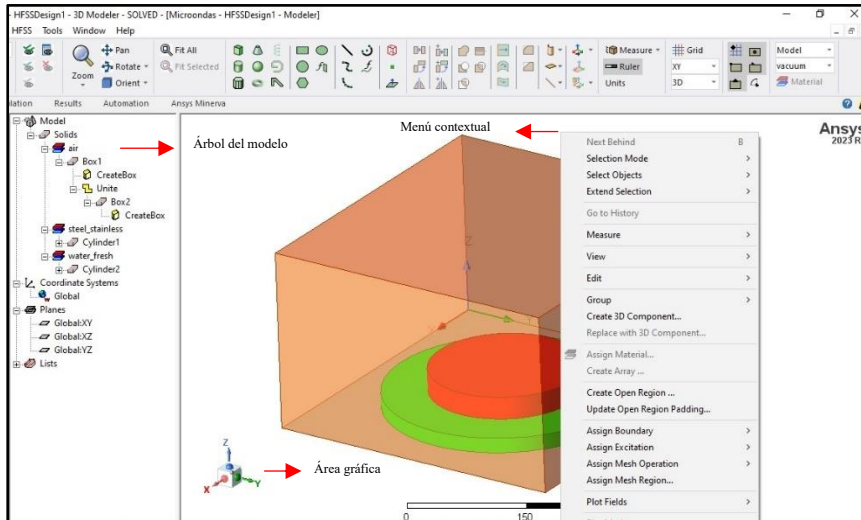
- Terminal excitado (Driven Terminal): Esta categoría calcula los parámetros S basados en los terminales de puertos en líneas de transmisión multiconductoras. Los resultados se expresan en términos de tensiones y corrientes en los terminales.
- Modo propio (Eigenmode): Este tipo calcula los modos propios o resonancia de la estructura en estudio. Determina las frecuencias resonantes y los campos asociados a estas frecuencias (ANSYS, 2005).

2.4.2 Generación de modelos paramétricos

Para crear un modelo, utilizamos la ventana del modelador 3D, que se compone de tres secciones principales: el árbol del modelo, los menús contextuales y el área gráfica. Asimismo, cuenta con dos interfaces: ventana de propiedades y la barra de estado.

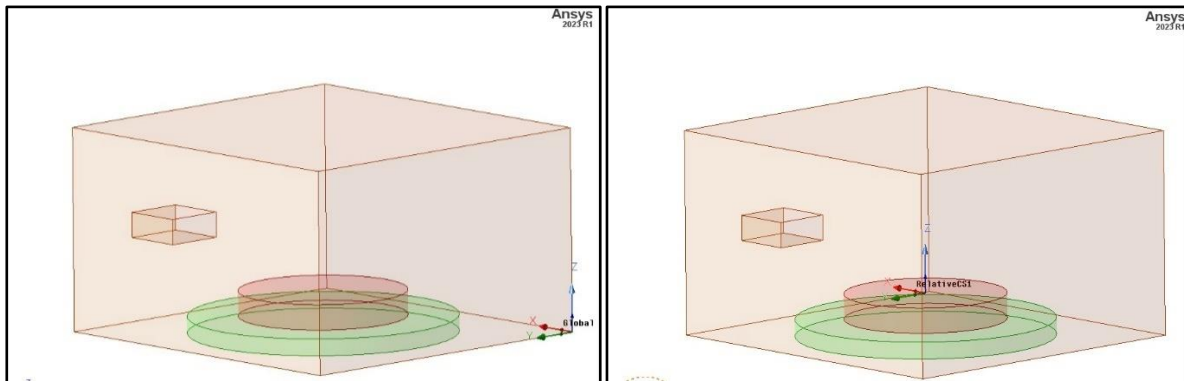
En la figura 18 se puede observar la ubicación de las tres secciones principales. El árbol del modelo permite acceder a los elementos estructurales, facilitando la visualización y edición de los parámetros del objeto. Además, los menús contextuales ofrecen una forma versátil de acceder a los comandos de menú más utilizados en el entorno actual. El área gráfica es donde se interactúa directamente con los elementos estructurales del modelo. Por otro lado, la ventana de propiedades se utiliza para ver o modificar los atributos y dimensiones del objeto. Y la barra de estado muestra los campos de entrada de coordenadas que definen los puntos y/o desplazamientos durante la creación del prototipo (ANSYS, 2005).

Figura 18:
Panel del modelador 3D con sus secciones principales



Cabe destacar que, otro aspecto relevante a considerar para el diseño es el sistema de coordenadas (CS). La posición de los elementos puede especificarse en diferentes sistemas, como coordenadas cartesianas, cilíndricas o esféricas. Una vez que se establece el primer punto, la entrada de coordenadas cambia a modo relativo. En este modo, las coordenadas ya no son absolutas, sino que se vuelven relativas al último punto ingresado. De esta misma manera, se puede establecer también un CS en la cara del modelo (ANSYS, 2013). En la figura 19 se ha ajustado una representación del sistema de coordenadas global y relativo.

Figura 19:
Sistema de coordenadas global (izquierda) y relativo (derecha)

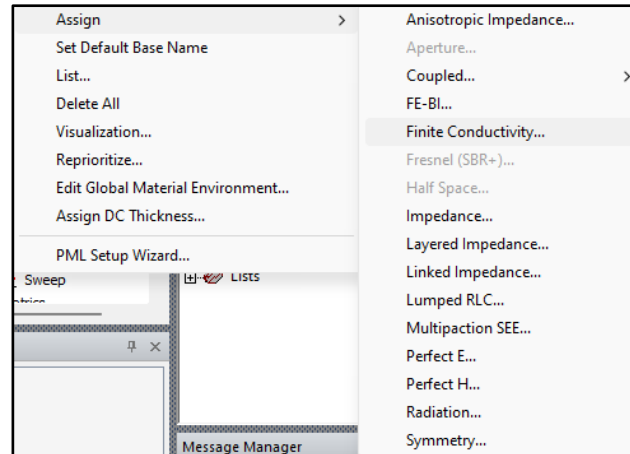


2.4.2.1 Fronteras (Boundaries). Las condiciones de contorno son esenciales para comprender y son fundamentales para resolver las ecuaciones de Maxwell. La ecuación de onda que resuelve ANSYS HFSS se deriva de la forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell. Para que estas expresiones sean válidas, se asume que los vectores de campo son de valor único, acotados y tienen una distribución continua al igual que sus derivadas. Sin embargo, a lo largo de las fronteras o en presencia de fuentes, los campos pueden ser discontinuos y las derivadas no tienen significado. Es aquí donde las condiciones de contorno juegan un papel clave: definen el comportamiento del campo a través de estas fronteras discontinuas, asegurando una correcta

solución del modelo. En la figura 20 se ha ajustado una representación de la guía para asignar un tipo de frontera al modelo.

Figura 20:

Guía para asignar una frontera al modelo



Las fronteras tienen dos propósitos principales. El primero es definir si el modelo es abierto o cerrado. Un modelo cerrado corresponde a una estructura o un volumen de solución donde no puede escapar energía, salvo por un puerto específico, como en el caso de una guía de ondas u otras estructuras completamente cerradas en soluciones modales o terminales. Por otro lado, un modelo abierto permite que la energía electromagnética se irradie o propague hacia el exterior. El segundo propósito de las fronteras en HFSS es reducir la complejidad geométrica o electromagnética del modelo, lo que facilita su análisis (ANSYS, 2005).

Las doce condiciones de frontera presentes en el simulador son:

- Conductor Eléctrico Perfecto (PEC): Crea un modelo cerrado.
- Radiación: Crea un modelo abierto.
- Capa Perfectamente Adaptada (PML): Crea un modelo abierto. Se opta para simulaciones de antenas.
- Conductividad finita: Permite la creación de conductores de una sola capa.
- Impedancia en capas: Permite la creación de conductores de una sola capa y dieléctricos delgados.
- Impedancia: Permite la creación de capas de material con resistencia.
- RLC concentrado: Permite la creación de componentes centrados ideales.
- Simetría: Permite una frontera simétrica.
- Maestra: Modela estructuras de arreglos repetidos infinitamente grandes.
- Esclava: Modela estructuras de arreglos repetidos de manera finita.
- Impedancia de pantalla: Permite la creación de pantallas o rejillas grandes.
- H Perfecto: Permite la creación de un plano de simetría.

Para el desarrollo de esta investigación se empleó el modelo Conductividad Finita. De ahí que, a continuación, se muestra su descripción.

2.4.2.1.1 Conductividad finita (Conductivity finite). La frontera de conductividad finita en HFSS es útil para modelar estructuras metálicas delgadas. En este tipo de frontera, los conductores son imperfectos, lo que implica ciertas pérdidas, y el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en la superficie se describe mediante la ecuación 34 (ANSYS, 2013):

$$E_{tan} = Z_s(\hat{n} \times H_{tan}) \quad (34)$$

Donde:

E_{tan} : Componente tangencial del campo eléctrico [V/m]

H_{tan} : Componente tangencial del campo magnético [A/m]

Z_s : Impedancia superficial de la frontera [Ω]

La impedancia se calcula como:

$$Z_s = \frac{1 + j}{\delta \sigma} \quad (35)$$

Donde:

δ : Profundidad de penetración [m]

σ : Conductividad del material [S/m]

Las figuras 21 y 22 muestran los parámetros ajustables y una representación visual al asignar una frontera de tipo conductividad finita.

Figura 21:
Parámetros ajustables de conductividad finita

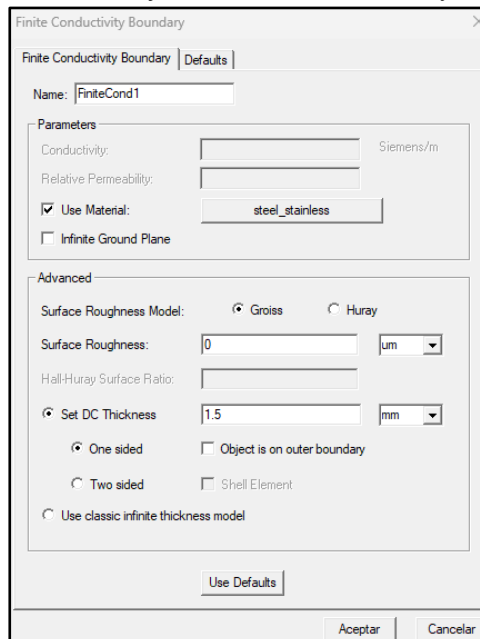
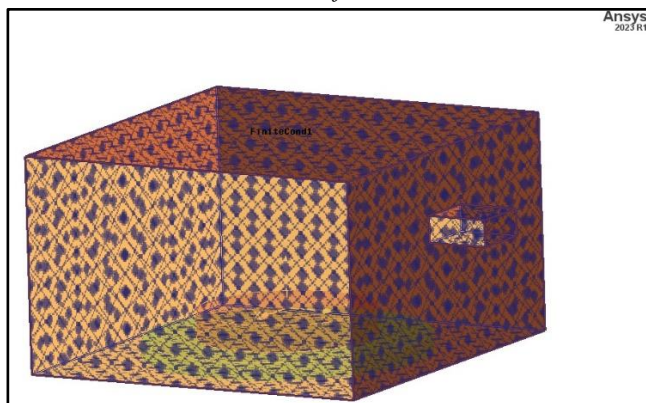


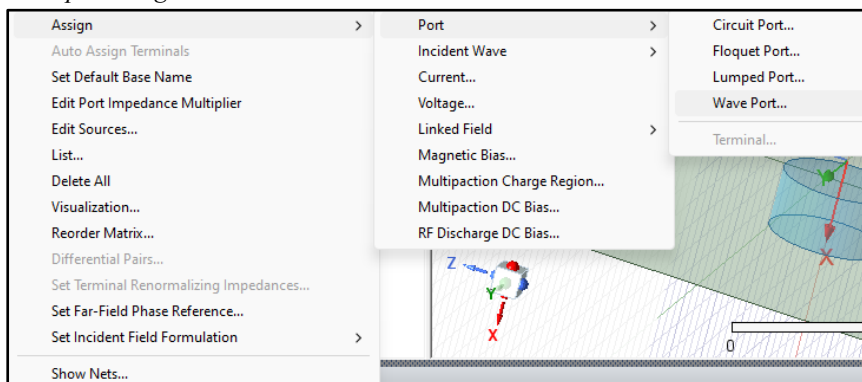
Figura 22:
Distribución de conductividad finita en el modelo



En síntesis, la frontera de conductividad finita en HFSS se utiliza para modelar conductores que permiten ciertas pérdidas.

2.4.2.2 Excitaciones (Excitations). Las excitaciones son primordiales al definir las fuentes de energía que interactúan con un dispositivo o estructura. Ello permite especificar cómo se introduce la energía en el sistema, proporcionando las condiciones necesarias para que se ejecute un campo electromagnético dentro del sistema. Estas fuentes pueden representar ondas incidentes, corrientes, voltajes o incluso campos magnéticos, las cuales, se seleccionarán dependiendo de la naturaleza y las condiciones de la simulación. En la figura 23 se ha ajustado una representación de la guía para asignar un tipo de excitación al modelo.

Figura 23:
Guía para asignar una excitación al modelo



Es relevante mencionar que, para poder calcular el campo electromagnético completo dentro de una estructura, primero es necesario definir el patrón de excitación en cada puerto. HFSS utiliza un solucionador especializado que determina los modos naturales o patrones de campo que pueden generarse en una estructura de transmisión con la misma geometría que el puerto (ANSYS, 2013). Los tipos de excitaciones más comúnmente empleados corresponde a Wave Port (Puerto de Onda) y Lumped Port (Puerto Agrupado). Dentro de los cuales, el empleado en esta investigación es puerto de onda. A continuación, se detallará más acerca de este tipo de puerto.

2.4.2.2.1 Puerto de onda (Wave port). Este puerto se usa específicamente en estructuras que funcionan como líneas de transmisión o guías de ondas. Calcula parámetros resaltantes tales como; la impedancia característica, la constante de propagación compleja y los parámetros S, los cuales, describen como las ondas se reflejan, dispersan y transmiten en su entorno de estudio.

Si se establece más de un puerto de onda, cada uno de ellos se excitará de manera individual. Esto significa que, al hacer la simulación, el software aplica energía a un puerto por vez, como si se estuviera "encendiendo" solo ese puerto para estudiar su comportamiento. En este proceso, cada modo incidente en el puerto (es decir, la manera en que la energía o la onda entra en el puerto) se configura para que transporte una cantidad específica de energía, por ejemplo 1 vatio de potencia promedio.

El patrón de campo de una onda a medida que viaja dentro de una guía de ondas está definido por una expresión derivada de las ecuaciones de Maxwell. La ecuación que resuelve el solucionador 2D es la se visualiza en la ecuación 36 (ANSYS, 2005):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E(x, y) \right) - k_0^2 \epsilon_r E(x, y) = 0 \quad (36)$$

En esta expresión, E representa el campo eléctrico oscilante, k_0 es el número de onda en el vacío y los términos μ_r y ϵ_r , representan la permeabilidad y la permitividad relativas del material.

En el contexto del tipo de solución "Driven Modal", al crear un puerto de onda, se debe especificar el número de modos deseados. Además de ello, se debe establecer una línea de integración³ en los puertos. Esta línea no solo permite calcular la impedancia de onda basada en voltaje que viaja por la línea de transmisión, sino que también actúa como una referencia de fase. La polaridad del voltaje se define a través de la punta de la flecha (+) y la base (-) de la línea terminal (ANSYS, 2013). Las figuras 24 y 25 muestran los parámetros ajustables y una representación visual al asignar una excitación de tipo puerto de onda.

³ Herramientas clave para definir la orientación y las propiedades de los modos de campo electromagnético que se propagan a través del puerto.

Figura 24:
Parámetros ajustables del puerto de onda

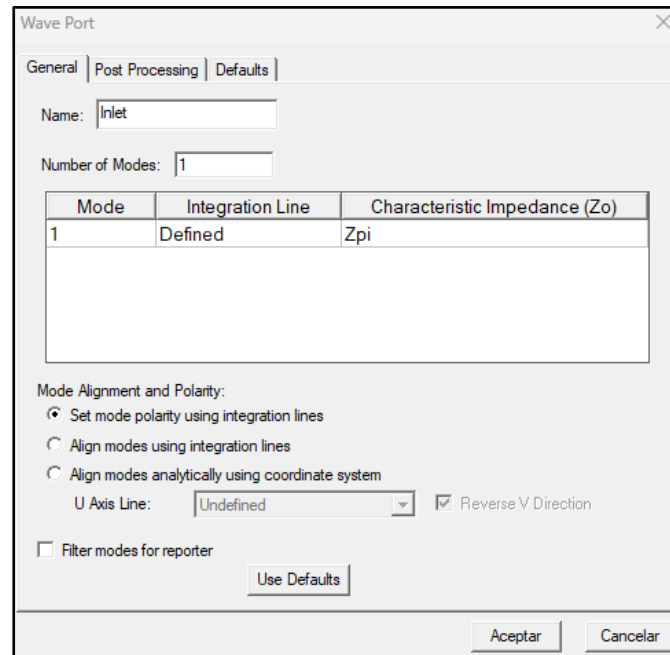
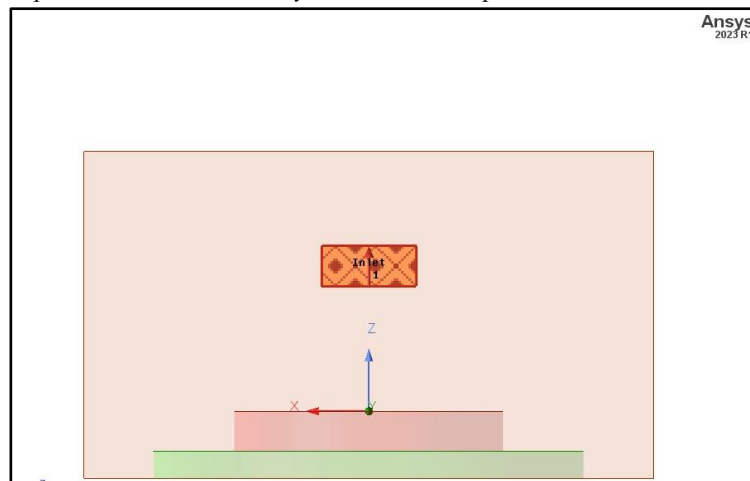


Figura 25:
Representación de la vista y orientación del puerto de onda



2.4.3 Análisis

2.4.3.1 Malla adaptativa. La malla adaptativa es una herramienta que permite ajustar la malla en función del rendimiento eléctrico del sistema. Este algoritmo tiene como objetivo identificar las regiones con los mayores gradientes en el campo eléctrico (E) o en el error de la simulación. Una vez localizadas estas áreas críticas, la malla se subdivide y refina en esas zonas, lo que mejora la resolución local donde más se necesita.

Tras cada refinamiento, se realiza una nueva solución completa del sistema. El proceso de refinamiento y solución se repite iterativamente hasta alcanzar los criterios de convergencia establecidos. El criterio predeterminado utilizado para determinar la convergencia de la malla/solución se denomina delta S, el cual, mide el cambio máximo en la magnitud de los

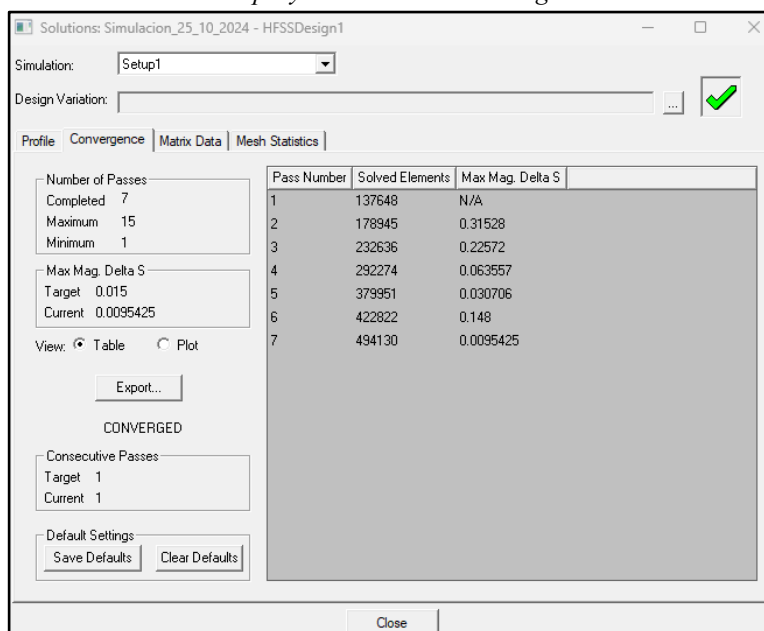
Parámetros S entre dos pasadas consecutivas, cubriendo todas las entradas de la matriz y está definida por la ecuación 37:

$$\text{Max}_{ij} \left[\text{mag}(S_{Nij} - S_{(N-1)ij}) \right] \quad (37)$$

Donde i y j corresponden a todas las entradas de la matriz y N indica el número de iteración. Como es la magnitud de una cantidad vectorial, puede variar entre 0 y 2. En general, un delta S de 0.02 (2%), que es el valor predeterminado, o tan bajo como 0.01 (1%), suele ser suficiente para determinar la convergencia. Este enfoque asegura que los resultados obtenidos sean no solo precisos, sino también eficientes en términos de recursos computacionales, al concentrar el refinamiento en las áreas más relevantes del modelo (ANSYS, 2013). La figura 26 muestra la sección de Pasadas de convergencia del solucionador del modelo.

Figura 26:

Panel de solución del proyecto – Sección convergencia

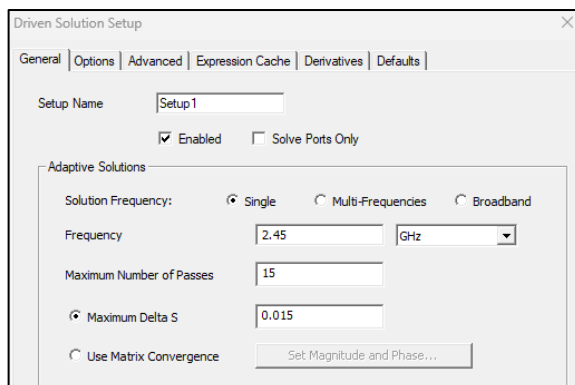


2.4.3.2 Configuración de solución. Para llevar a cabo un análisis en HFSS, es necesario añadir una configuración de solución (Solution setup), donde se deben considerar las siguientes características generales para su adecuada configuración.

- Frecuencia de solución: Se debe establecer el punto de frecuencia de solución de la simulación, el cual será empleado por el mapeador adaptativo para realizar el refinamiento automático de la malla.
- Número máximo de pasadas o iteraciones: Este valor determina la cantidad máxima de pasadas que llevará a cabo la malla adaptativa.
- Delta máximo de S: Este valor indica que mientras más pequeño es, el número de elementos finitos es elevado con la finalidad de obtener una mejor precisión en la solución de distribución de campo eléctrico. De ahí que, el software es de tipo adaptativo.

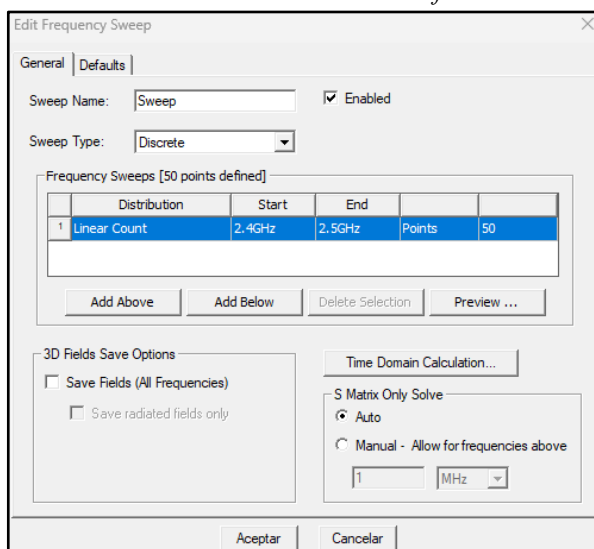
Los datos de las pestañas complementarias, como opciones (Options), avanzado (Advanced) y predeterminado (Defaults), se configurarán utilizando la información que ANSYS proporciona por defecto para la simulación. Esto asegura que los parámetros iniciales sean adecuados y se alineen con las configuraciones estándar del software, permitiendo así una ejecución óptima del análisis (ANSYS, 2013). En la figura 27 se visualizan los parámetros ajustables para la configuración de la solución.

Figura 27:
Ventana de los parámetros de la configuración de solución



2.4.3.3 Barrido de frecuencia. El barrido de frecuencia permite estudiar como los dispositivos responden a diferentes frecuencias dentro de un rango específico. ANSYS HFSS proporciona varios procedimientos para realizar barridos de frecuencia, la metodología se escogerá dependiendo las características del dispositivo y los requerimientos de la simulación. A continuación, se describirán los principales tipos más utilizados (ANSYS, 2005). En la figura 28 se muestran los indicadores para la configuración del barrido de frecuencia.

Figura 28:
Panel de los indicadores del barrido de frecuencia



- Discreto (Discrete): Este método proporciona resultados detallados para cada frecuencia dentro del rango especificado, realizando una solución completa para cada punto de frecuencia. Con la finalidad de tener en detalle los resultados para cada una de las frecuencias que conforma el intervalo requerido para la simulación, se hizo uso en esta investigación de este barrido de frecuencia.
- Rápido (Fast): Este enfoque utiliza algoritmos adaptativos para extrapolar una banda de frecuencias a partir de una frecuencia central, lo que lo hace más eficiente para dispositivos con alta resonancia.
- Interpolado (Interpolating): Esta técnica calcula soluciones en puntos específicos de frecuencia, ajustando los resultados mediante interpolación para generar una curva continua.

2.4.4 Resultados

2.4.4.1 Trazado de superposición de campos (Field overlay plots). Al realizar un trazado de superposición de campos, se puede evaluar y analizar cómo se comportan los campos electromagnéticos en diferentes partes y/o vistas del modelo de estudio. ANSYS HFSS proporciona una amplia variedad de opciones para visualizar y entender estos campos. Para el desarrollo de esta investigación, se ha hecho uso del campo E (Campo eléctrico) que es fundamental en el análisis electromagnético:

Campo eléctrico: Representa la magnitud del campo eléctrico y permite visualizar cómo la parte eléctrica de las microondas interactúan en el diseño. En las figuras 29 y 30 representan las dos maneras de representación del campo eléctrico: Mag E y Vector E.

Figura 29:

Representación transversal del campo eléctrico del modelo en Mag E

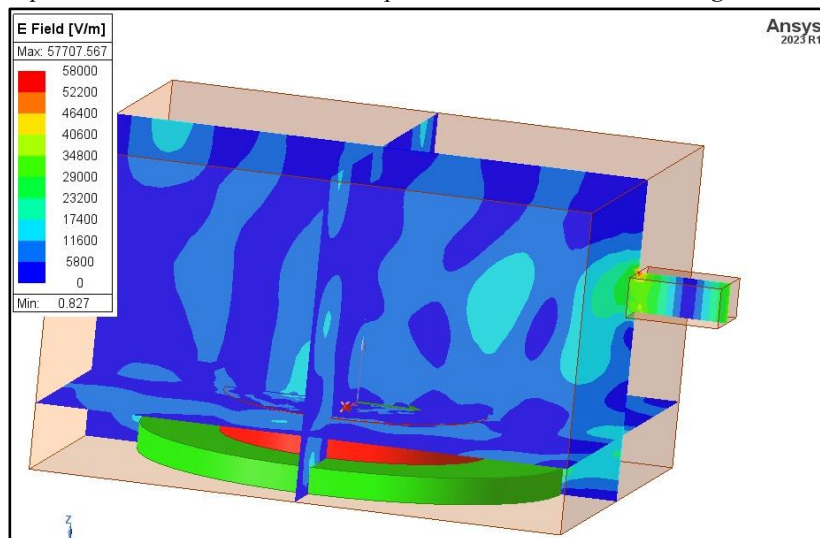
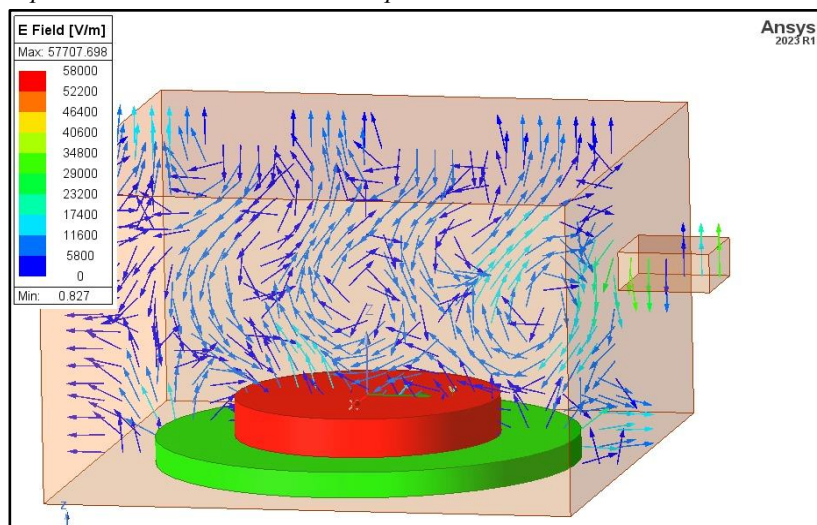
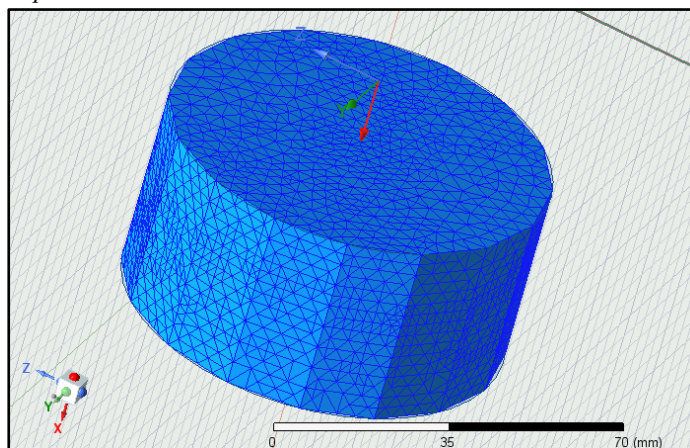


Figura 30:
Representación transversal del campo eléctrico del modelo en Vector E



2.4.4.2 Trazado de superposición de malla (Mesh overlay plot). La precisión en la simulación de ANSYS HFSS depende en gran medida de la calidad de la malla generada, que subdivide la geometría del modelo en pequeños tetraedros para resolver las ecuaciones de campo. En la figura 31 se puede apreciar una representación del mallado para un elemento simulado.

Figura 31:
Representación del mallado del modelo



Este tipo de trazado permite visualizar gráficamente la distribución de la malla en el modelo y detectar áreas que pueden requerir un refinamiento adicional para mejorar la precisión de los resultados. En las zonas de alta complejidad geométrica o de concentración de campos se concentra una mayor densidad de tetraedros, lo que optimiza la simulación. Cabe señalar que, la malla también se puede refinar con una configuración manual si se desea.

2.4.5 Bucle de solución

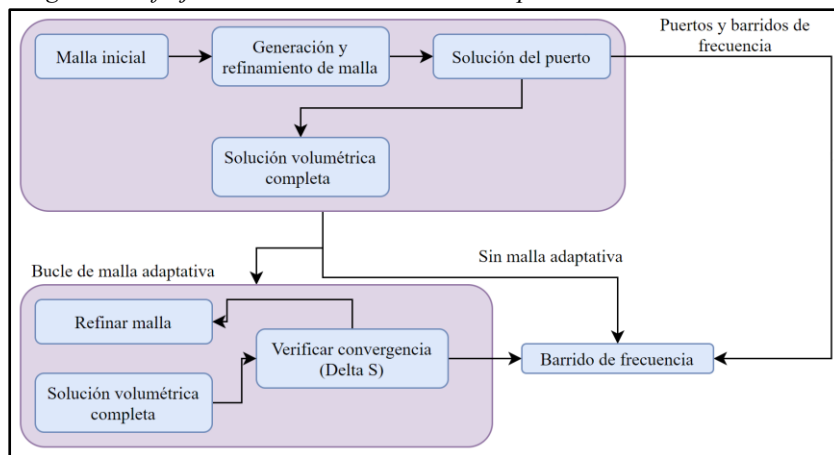
El proceso de solución es esencialmente automatizado una vez que el problema ha sido correctamente definido, lo que optimiza el tiempo y garantiza precisión en los cálculos. El bucle

de solución se encarga de gestionar automáticamente las diversas etapas que componen el proceso de análisis electromagnético, asegurando que la malla se refine adecuadamente y que los resultados converjan de manera precisa. Está compuesto por tres componentes principales:

- **Solución inicial:** Esta etapa incluye la generación de la malla del modelo, la configuración de los puertos y la resolución completa del problema a una frecuencia específica. Esta solución inicial establece la base para las siguientes fases del análisis, asegurando que las condiciones de borde y los parámetros del modelo se hayan aplicado correctamente.
- **Bucle de refinamiento adaptativo:** Una vez obtenida la solución inicial, HFSS procede a mejorar la precisión mediante el refinamiento adaptativo de la malla en la frecuencia inicial. Durante este bucle, la malla se ajusta y se refina iterativamente hasta que se alcanza la convergencia en los resultados. Este proceso es crucial, ya que asegura que la malla utilizada es lo suficientemente fina para capturar con precisión los fenómenos electromagnéticos que se analizan.
- **Barrido de frecuencia:** Después de lograr la convergencia en la solución adaptativa, el software calcula la respuesta en todo el rango de frecuencias mediante el uso de la malla refinada. Esto permite obtener un análisis completo del comportamiento del modelo en varias frecuencias de interés, lo que es particularmente útil para estudiar la respuesta en frecuencia de dispositivos como antenas y circuitos (ANSYS, 2005). La figura 33 contiene una representación del bucle de solución que ejecuta ANSYS.

Figura 32:

Diagrama de flujo de simulación con malla adaptativa



2.5 Proceso de transferencia de HFSS a Icepak

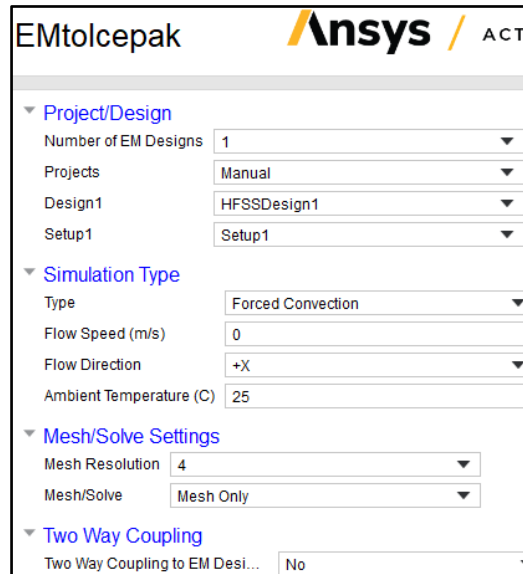
Tras haber obtenido un análisis electromagnético en HFSS tal como se ha podido ver en la figura 29, se inicia la extensión Electro-Thermal ACT (aplicación de herramientas personalizadas) o también conocida como EM to Icepak con la finalidad de realizar el análisis térmico de los elementos en el estado transitorio mediante la herramienta Icepak.

En la figura 33 se visualizan las ediciones que a continuación se comentan. En principio se selecciona el número de diseños electromagnéticos como uno, el proyecto nombrado como “Manual”, el diseño en HFSS creado por defecto y su configuración realizada. Luego, se

selecciona que la simulación sea con convección forzada, pero con velocidad de aire 0 m/s para anular dicho mecanismo de transferencia de calor dado que la cavidad del horno microondas es un sistema aislado. Asimismo, que la temperatura inicial de los elementos sea de 25 °C. Después, se procede con la configuración del mallado en el nivel cuatro de cinco para tener una alta precisión. Por último, se coloca “No” para que las propiedades térmicas y eléctricas se consideren constantes a pesar de los cambios de temperatura.

Figura 33:

Configuración para pasar de HFSS a Icepak



Es así como, automáticamente se genera el mallado, las condiciones de frontera y la superficie y volumen de los objetos afectados por la energía de microondas. Las figuras 34 y 35 muestra una representación de lo comentado.

Figura 34:

Mallado, condiciones de frontera y superficie y volumen de objeto a analizar

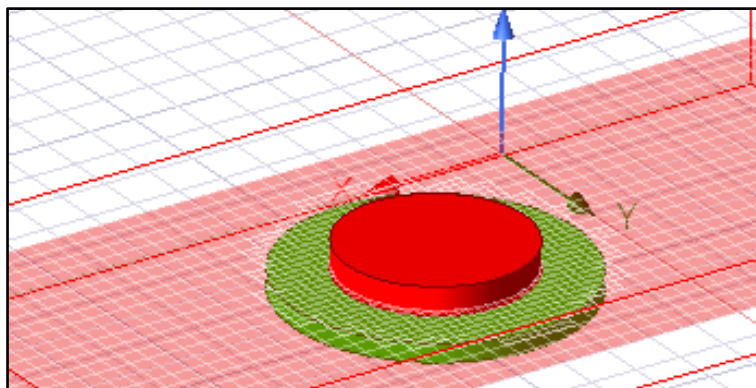
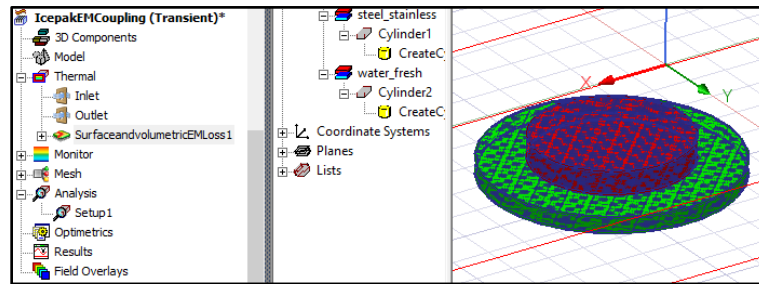


Figura 35:

Condiciones de frontera y superficie y volumen de objeto a analizar



Cabe resaltar que, el software ubica los objetos dentro de una región de aire donde las condiciones de frontera para el análisis térmico son con al menos presión y velocidad del aire. Sin embargo, para el modelo de objetos dentro de una cavidad de horno microondas, es suficiente con colocar cero a dichas magnitudes para tener un sistema aislado.

2.6 Interfaz de usuario y proceso de simulación en ANSYS Icepak

A continuación, en la figura 36 se muestra la interfaz de la herramienta ANSYS Icepak que es en gran medida similar a la de ANSYS HFSS a diferencia de que solo analiza los objetos afectados notablemente por las microondas. La importancia de esta herramienta radica en poder realizar un análisis térmico en función del tiempo para los objetos dentro de un horno microondas. De ahí que, primero se ajusta el tipo de solución como transitorio tal como se puede ver en la figura 37, y luego se establece el tiempo de simulación en 50 segundos como en la figura 38.

Figura 36:

Interfaz de ANSYS Icepak

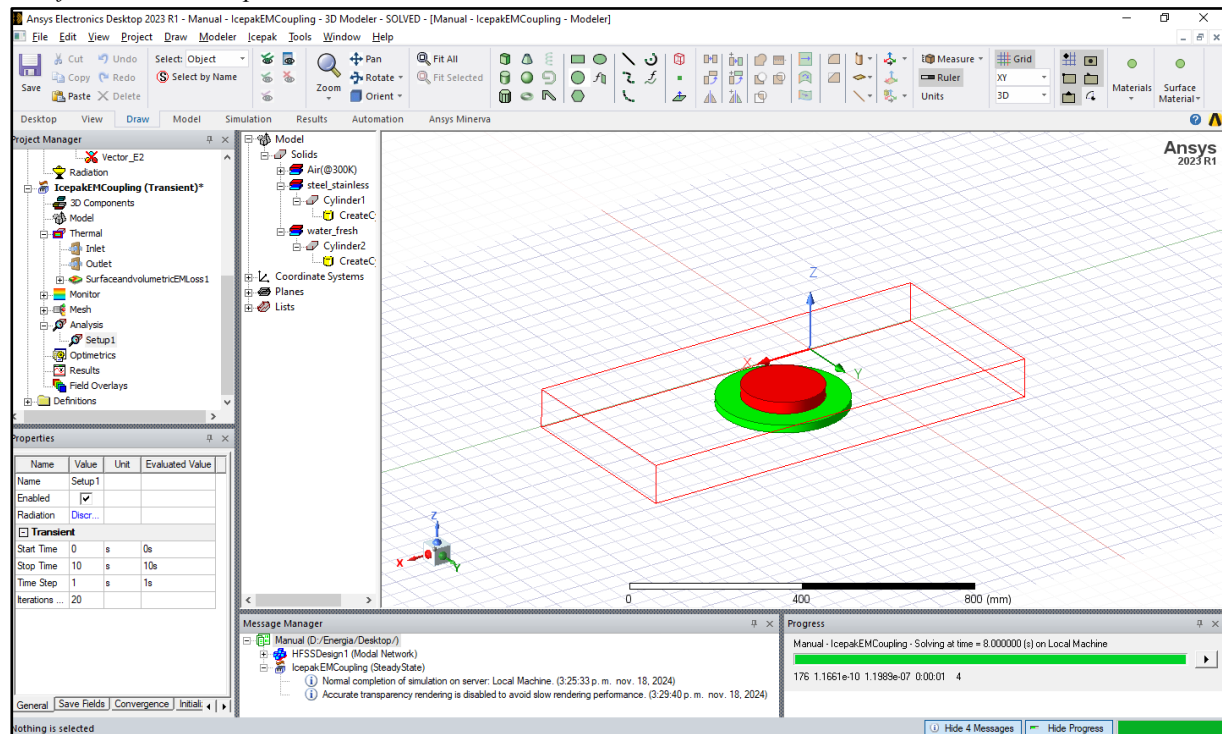


Figura 37:
Tipo de solución

Solution types

Steady State

Transient

Problem types

Temperature and Flow

Temperature Only

Flow Only

Figura 38:
Configuración del análisis térmico transitorio

General | Save Fields | Convergence | Solver Settings | Radiation | Defaults

Name: Setup1 Enabled

Transient Setup

Start: 0 s

Stop: 50 s

Time Step: 1 s Advanced

Iterations / Time step: 20

Problem Types

Temperature Flow

Flow Regime

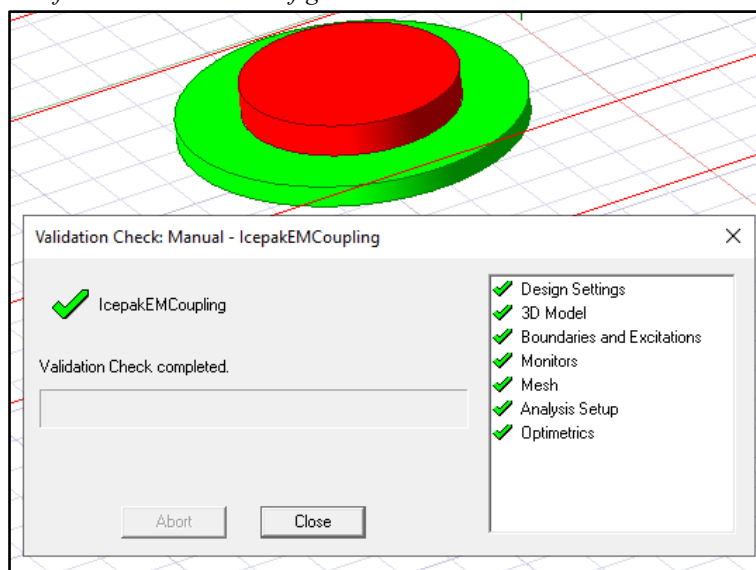
Laminar Turbulent

Radiation Model

Off Discrete Ordinates Ray Tracing

Una vez establecidas las condiciones y configuraciones de simulación, se procede a verificar que la simulación cuente con todo lo necesario para ejecutar la simulación y obtener los resultados térmicos. La figura 39 muestra el cuadro de diálogo que se genera al verificar el modelo.

Figura 39:
Verificación de buena configuración



De modo que, se obtiene el análisis térmico tras el tiempo de 50 segundos. Ello se puede ver de dos formas: ploteo de distribución de temperatura y tabulación. Gráficamente se pueden apreciar en las figuras 40 y 41. En ambas opciones se observa el mínimo, máximo y promedio de temperatura para la superficie y volumen de la muestra. Si se hace un breve análisis para esta simulación contemplada para el manual, se podría comentar que intuitivamente la absorción de energía por parte de la muestra es baja dado que el incremento de temperatura promedio en el volumen para 50 segundos es solo de 2 °C. Por lo que, se necesitaría realizar un estudio de los parámetros de diseño para optimizar el modelo.

Figura 40:

Ploteo de distribución de temperatura

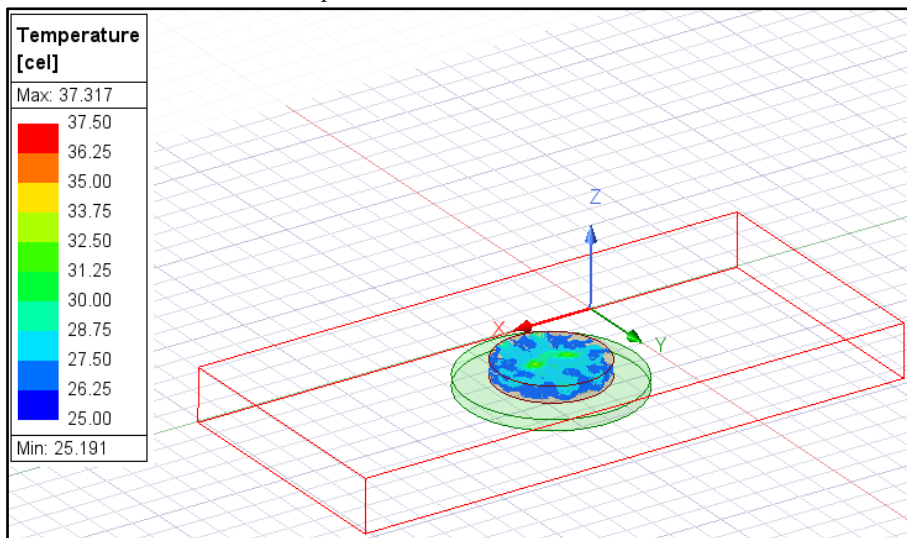
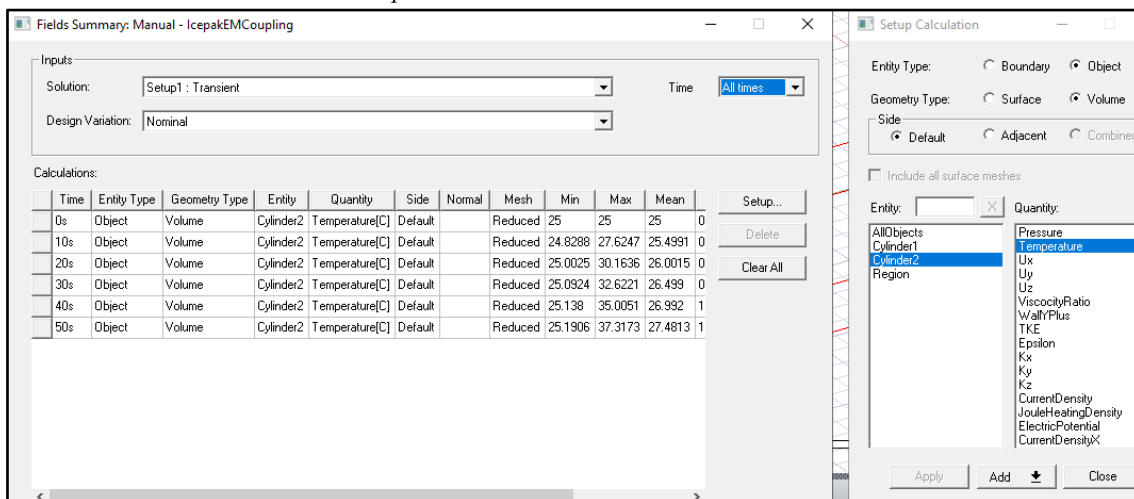


Figura 41:

Tabulación de los resultados de temperatura



Capítulo 3

Dinámica computacional con casos validados

3.1 Validación con artículo 1

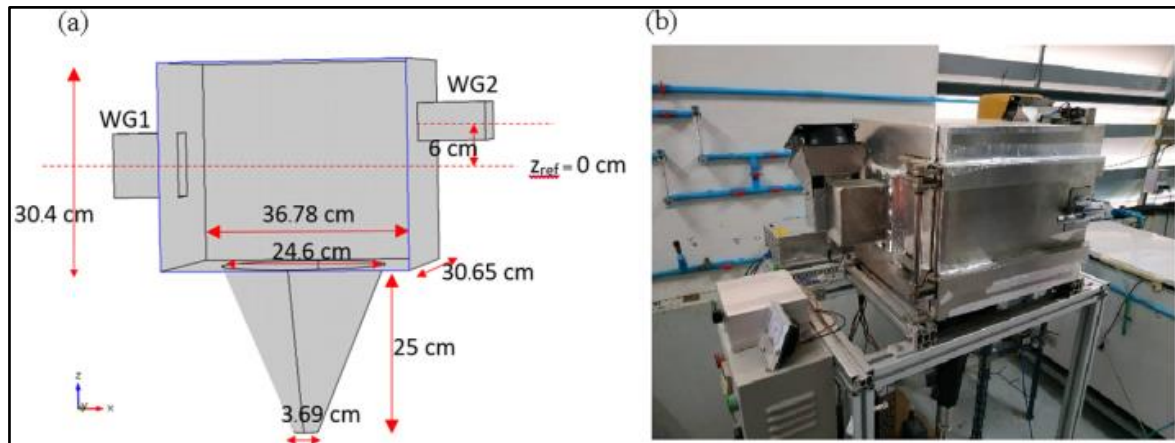
En el artículo científico “Simulation and experimentation on parameters influencing microwave-assisted extraction of bioactive compounds from *Kaempferia parviflora* rhizomes” de (Nisoa, y otros, 2022) e indexado en la revista Alexandria Engineering Journal, se evidencia el desarrollo satisfactorio de un prototipo extractor de componentes bioactivos basado en microondas. Para ello, se utilizó el software COMSOL Multiphysics, donde se efectuó la simulación de microondas y distribución de campos eléctricos en la cavidad resonante del sistema con microondas. Asimismo, la simulación tras ejecutar diferentes variantes permitió el óptimo dimensionamiento de la cámara y adecuada posición de los magnetrones con la finalidad de maximizar el calentamiento del producto en la cámara.

Tras realizar la experimentación, los valores de componentes bioactivos extraídos el en solvente del jengibre negro (*Kaempferia parviflora* rhizomes) mediante el extractor con microondas a 83 °C y en 2.5 minutos fueron superiores que los métodos donde se usaba un extractor con ultrasonido a 30 minutos o extractor de Soxhlet a 60 minutos. Lo que demuestra que aplicar la tecnología basada en microondas es una excelente forma para extraer componentes bioactivos y mostrar su aplicación comercial. Además, tras simularse en computadora, se ha conseguido una herramienta adecuada para optimizar la energía de microondas y así superar retos en el proceso industrial de eliminar componentes bioactivos en los alimentos con el fin de mejorar su calidad.

A continuación, se muestran las condiciones de simulación establecidas y resultados obtenidos en el artículo.

3.1.1 Condiciones de simulación

- Dimensiones. Tras encontrar las óptimas dimensiones de la cavidad del extractor basado en microondas y la adecuada posición de las guías de onda donde se ubican los magnetrones, se obtuvo lo mostrado en la figura 42.
- Potencia y frecuencia. Dos magnetrones de 1 kW y 2.45 GHz cada uno.
- Guías de onda. Modelos estándar rectangulares de $8 \times 4 \times 12$ cm. Uno en horizontal (WG2) y otro en vertical (WG1) para optimizar la intensidad y distribución del campo eléctrico dentro de la cámara.
- Material. Aire dentro y superficie externa metálica no magnética.

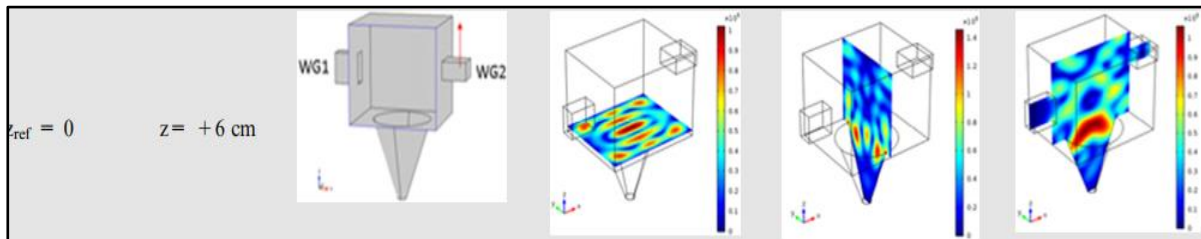
Figura 42:*Geometría del extractor con microondas construido*

Nota. Tomado de Simulation and experimentation on parameters influencing microwave-assisted extraction of rhizomes (p. 362), por (Nisoa, y otros, 2022), Alexandria Engineering Journal

3.1.2 Resultados de simulación

Figura 43:

Distribución planar de la simulación de campo eléctrico en la cámara de calentamiento con microondas para el prototipo construido



Nota. Tomado de Simulation and experimentation on parameters influencing microwave-assisted extraction of rhizomes (p. 361), por (Nisoa, y otros, 2022), Alexandria Engineering Journal

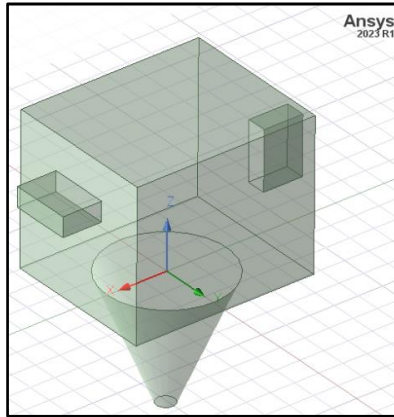
Se puede apreciar en la figura 43 que, de todas las simulaciones realizadas en el artículo, los mejores resultados de campo eléctrico se obtuvieron tras colocar 6 cm por encima de la mitad de la cavidad resonante a la guía de onda WG2. De ahí que, la forma de sus patrones en los planos XY, YZ y XZ indican alta concentración de campo eléctrico en el centro de la cavidad, lo que orienta a colocar los productos en dicha posición para maximizar la conversión de energía de microondas en energía térmica.

Ahora bien, tras tener las condiciones de simulación del artículo validado con resultados experimentales y verificado en una revista de prestigio, se procede a realizar la simulación con la herramienta HFSS incluida en el software ANSYS Electronics con el fin de corroborar que este software también garantiza resultados adecuados para el desarrollo y optimización de prototipos de deshidratación basados en microondas.

3.1.3 Pasos de simulación propia

1) Geometría. Se dibuja la geometría del prototipo mostrado en el artículo mencionado, tal como se puede ver en la figura 44.

Figura 44:
Geometría del artículo en HFSS



3) Material y condiciones de frontera. Se asigna el material a la estructura interna como aire, y se seleccionan las caras externas a excepción de las entradas para asignarles la condición de material metálico como finite conductivity tal como en las figuras 45 y 46 respectivamente.

Figura 45:
Selección del material aire

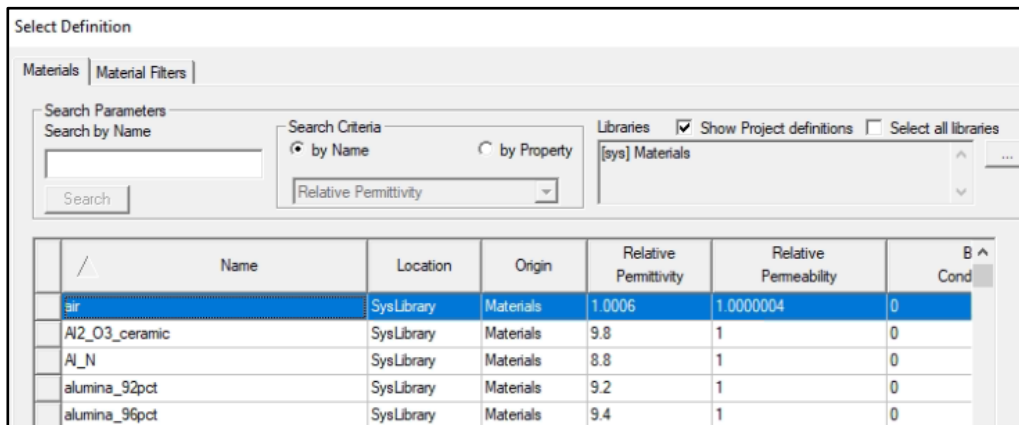
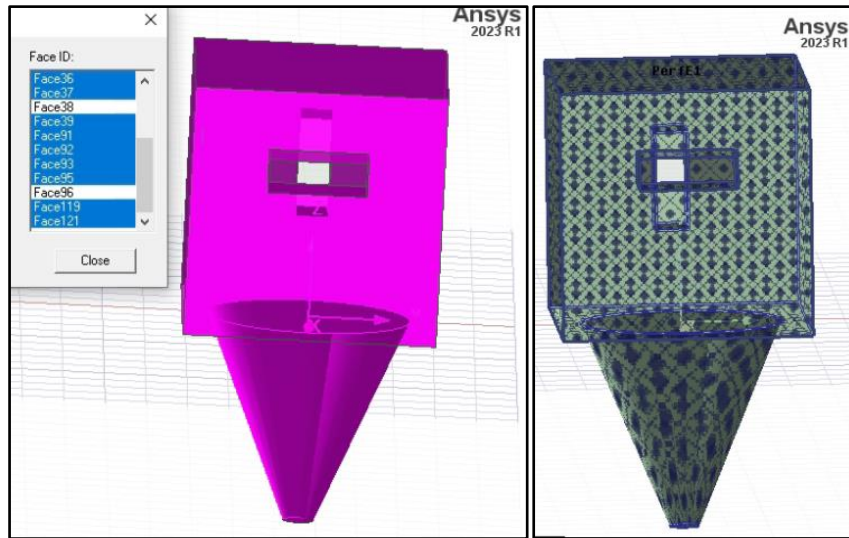


Figura 46:

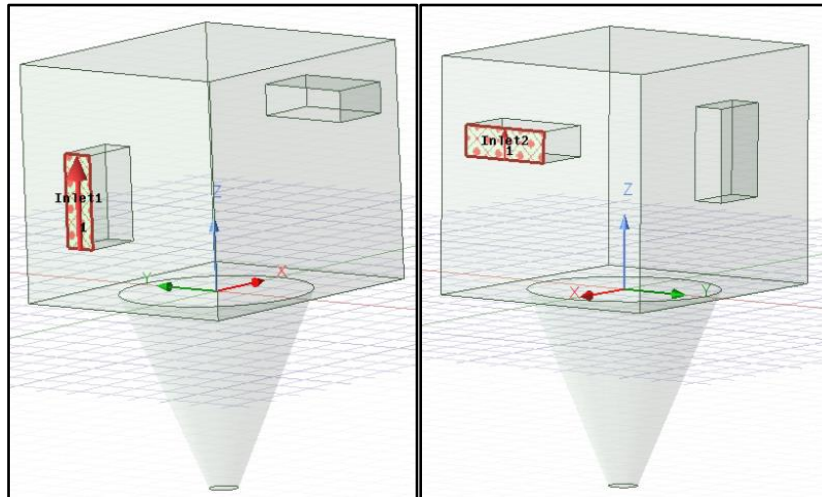
Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa sin considerar entradas



4) Entradas y potencia. Se configuran los puertos de entrada donde se ubican las guías de onda con sus respectivos magnetrones, tal como se muestra en la figura 47. Asimismo, se configuran las potencias de entrada que suministra cada magnetrón como se muestra en la figura 48.

Figura 47:

Asignación de puertos de entrada

**Figura 48:**

Asignación de entradas con potencias de 1 kW por cada magnetrón

| HFSSDesign1] Edit post process sources | | | | | | |
|--|----------|------|-----------|------|-------|------|
| Spectral Fields Source Context | | | | | | |
| | Source | Type | Magnitude | Unit | Phase | Unit |
| 1 | Inlet2:1 | Port | 1000 W | | 0 deg | |
| 2 | Inlet1:1 | Port | 1000 W | | 0 deg | |

5) Configuración del solucionador y frecuencia de operación. Aquí se configura tal como en la figura 49, la frecuencia de trabajo, en este caso 2.45 GHz. Asimismo, se establece como parámetros de convergencia que el software realice 20 iteraciones o un delta S máximo de 0.02. El número de iteraciones correcto se determina hasta que la simulación converge. La magnitud del delta S máximo fue recomendado por el personal técnico de ANSYS como valor estándar para simulaciones de este tipo. Adicional a ello, se configura el barrido como discreto y que efectúe un análisis de frecuencia en 10 puntos desde 2.4 a 2.5 GHz tal como la figura 50.

Figura 49:

Configuración de solución adaptativa del software

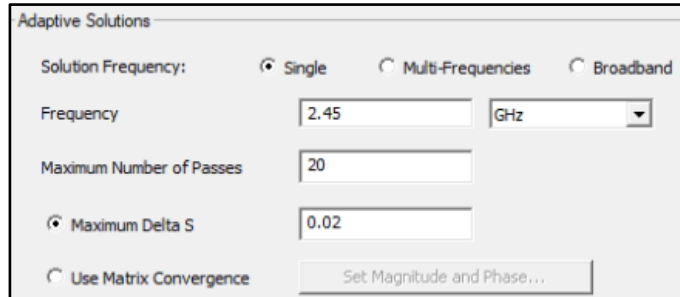
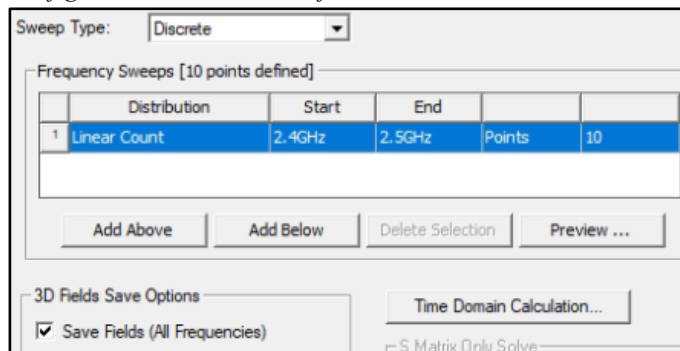


Figura 50:

Configuración de barrido de frecuencias

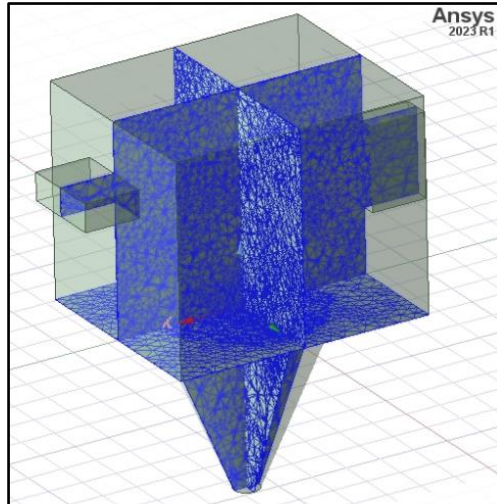


6) Mallado y número de elementos. Se puede apreciar que el software, tras cumplir con los parámetros de convergencia, determina que el mejor mallado para obtener una alta precisión en la distribución de campo eléctrico es con 124775 elementos. En la figura 51 se observa una representación del mallado desarrollado para la cavidad.

Figura 51:

Mallado y número de elementos para la cavidad

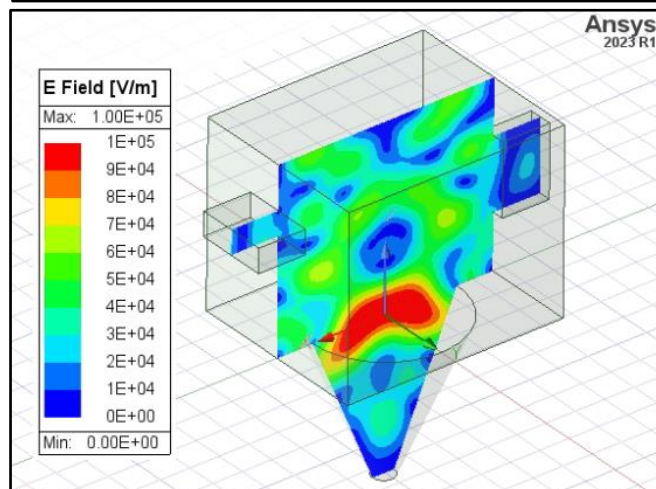
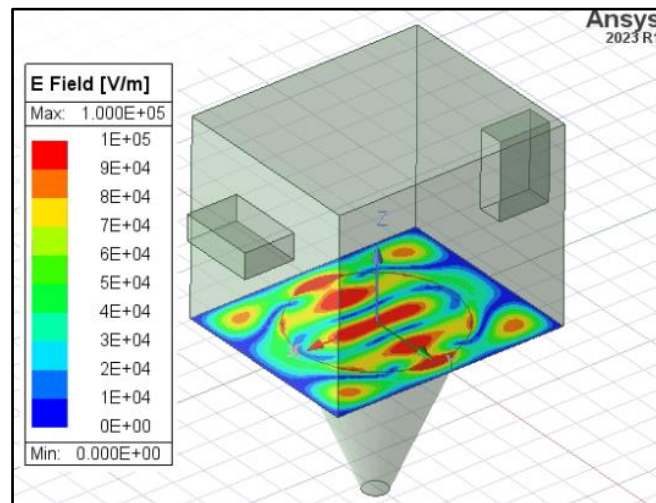
| Total number of elements: 124775 | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| | Num Tet... | Min edge len... | Max edge len... | RMS edge len... | Min tet vol... | Max tet vo... | Mean tet v... | Std Devn (v... |
| Cavidad | 124775... | 4.39349 | 61.247 | 18.5569 | 5.25129e... | 3032.47... | 317.982... | 238.38 |

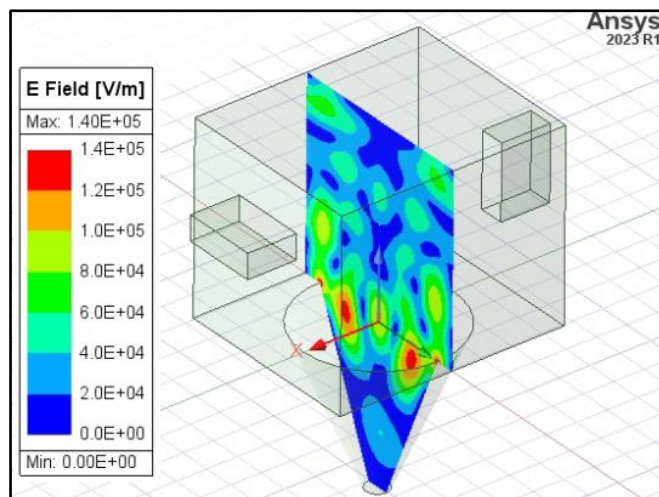


7) Resultados. Tras ejecutar el análisis, se obtienen las siguientes distribuciones de campo eléctrico en los planos XY, XZ y YZ:

Figura 52:

Distribución planar de la simulación de campo eléctrico planos XY, XZ y YZ para prototipo de artículo en ANSYS Electronics





De la figura 52 se puede apreciar como los resultados de campo eléctrico son similares a los logrados en el artículo de (Nisoa, y otros, 2022) tanto en forma como en intervalos de la escala numérica mostrados en la figura 43. Lo que valida el uso de ANSYS HFSS para la simulación de otros prototipos.

3.2 Validación con artículo 2

En el artículo científico “Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study” de (Li, y otros, 2023) e indexado en la revista Energy, se evidencia el desarrollo satisfactorio de un modelo electromagnético y de transferencia de calor aplicado a un sistema de microondas para deshidratación de los desperdicios de tallos de tabaco mediante el software COMSOL Multiphysics. Ello con la finalidad valorizar dichos residuos al convertirlos en productos en forma de biomasa para bioenergía sostenible y aceite natural.

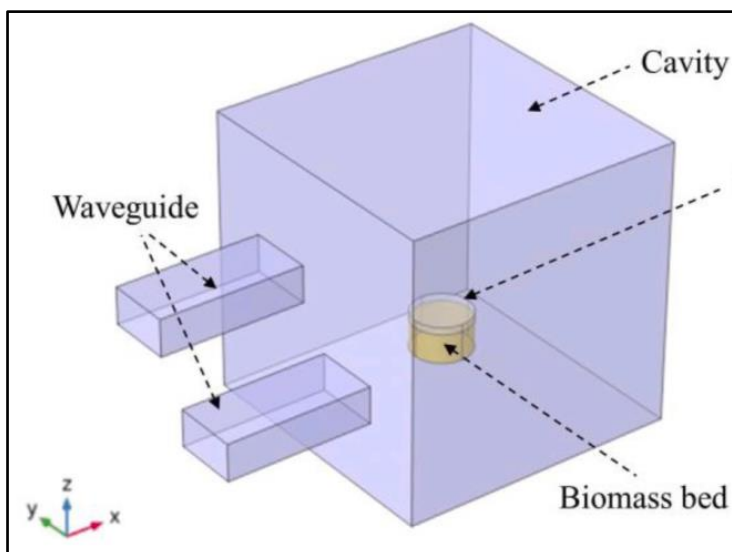
Con el programa COMSOL se simuló el efecto de modificar diferentes parámetros, y tras la validación experimental se obtuvo un error relativo máximo del 10%. Asimismo, los resultados mostraron como la formación de puntos calientes causados por las microondas estacionarias generan una distribución no uniforme de temperatura. De manera que, se diseña una cavidad resonante con dos guías de onda y cambios controlados de frecuencia para mejorar la absorción de energía en la biomasa y un calentamiento uniforme.

3.2.1 Condiciones de simulación

- Dimensiones. En la investigación, tras realizar diferentes pruebas, los investigadores encontraron las óptimas dimensiones de la cavidad de microondas y la adecuada posición de las guías de onda donde se ubican los magnetrones, se obtuvo lo mostrado en la figura 53 y tabla 4:

Figura 53:

Geometría del sistema de microondas para tratamiento de la biomasa de tallos de tabaco



Nota. Tomado de Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study, por (Li, y otros, 2023), Energy

Tabla 4:

Dimensiones de las geometrías

| Geometría | Largo [cm] | Ancho [cm] | Altura [cm] | Radio [cm] |
|-----------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Cavidad de microondas | 38 | 38 | 38 | – |
| Guía de ondas | 20 | 9 | 5 | – |
| Muestra de Tabaco | – | – | 4 | 4 |

Nota. Tomado de Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study, por (Li, y otros, 2023), Energy

- **Potencia y frecuencia.** Dos magnetrones de 2.45 GHz cada uno y con una potencia total máxima de 2 kW, sin embargo, variando entre 500, 1000 y 1500 W por 120 segundos para la experimentación. En la simulación se consideró el modo transversal eléctrico T10 de las microondas para excitar las guías de onda rectangulares.
- **Guías de onda.** Modelos estándar rectangulares de $20 \times 9 \times 5$ cm. Ambas colocadas de forma horizontal y ubicadas en la diagonal de la cara YZ de la cavidad resonante para optimizar la intensidad y distribución de campo eléctrico dentro de la cámara de calentamiento.
- **Residuos de tabaco.** Los tallos de tabaco presentan una temperatura uniforme inicial de 25 °C (298.15 K), humedad de 10%, propiedades eléctricas y térmicas isotrópicas y homogéneas. De manera que, la capacidad calorífica específica, la permitividad relativa y la conductividad térmica son constantes para todas las temperaturas y frecuencias. Asimismo, se brindan las propiedades en la tabla 5:

Tabla 5:
Propiedades de los tallos de tabaco.

| | Propiedades | Símbolo | Unidad | Valor |
|------------|---------------------------------|--------------|----------|-----------------------|
| Eléctricas | Permitividad eléctrica | ϵ_r | - | $1.40 - 0.1 \times j$ |
| | Permeabilidad eléctrica | μ_r | - | 1 |
| | Conductividad eléctrica | σ | S/m | 0 |
| Térmicas | Conductividad térmica | k | W/mK | 0.103 |
| | Capacidad calorífica específica | C_p | J/kgK | 1178 |
| | Densidad aparente | ρ | kg/m^3 | 248.76 |
| | Temperatura inicial | T_0 | K | 298.15 |

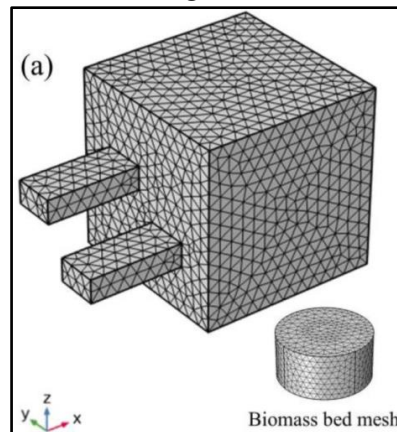
Nota. Tomado de Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study, por (Li, y otros, 2023), Energy

- Material interno. Se establece aire dentro de la cavidad, sin embargo, se desprecia el flujo de aire y la transferencia de calor al ambiente.
- Material externo. Superficie externa metálica de acero inoxidable con espesor despreciable. Además, cabe señalar que todos los materiales son no magnéticos, por lo que la interacción con campos magnéticos no se considera.
- Fenómenos despreciados. Se desprecia la transferencia de masa, la deformación térmica y las reacciones químicas de la biomasa del tabaco.

3.2.2 Resultados de simulación

La figura 54 es una representación del mallado de la geometría. Se generaron 65 999 elementos a partir de un refinamiento de tamaño máximo de 6 mm y 30 mm para la muestra de tallo de tabaco y cavidad resonante respectivamente con la finalidad de obtener resultados precisos.

Figura 54:
Mallado de las geometrías

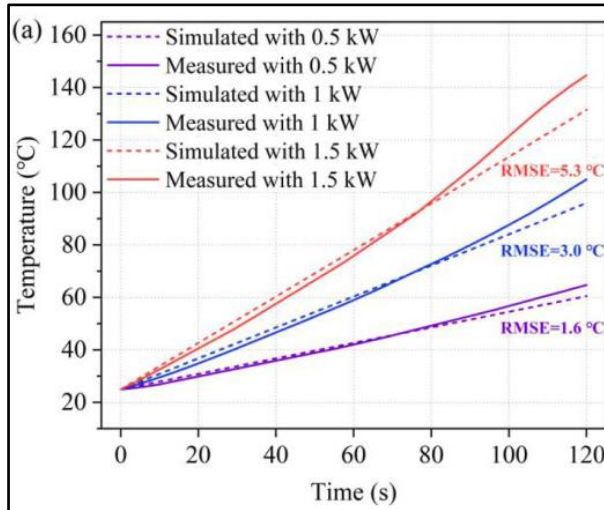


Nota. Tomado de Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study, por (Li, y otros, 2023), Energy

A continuación, en la figura 55 se presentan los resultados obtenidos tanto de forma experimental como de simulación para potencias de 500, 1000 y 1500 W en un tiempo de 120 segundos.

Figura 55:

Curvas de temperatura tras simulación y experimentación



Nota. Tomado de Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study, por (Li, y otros, 2023), Energy

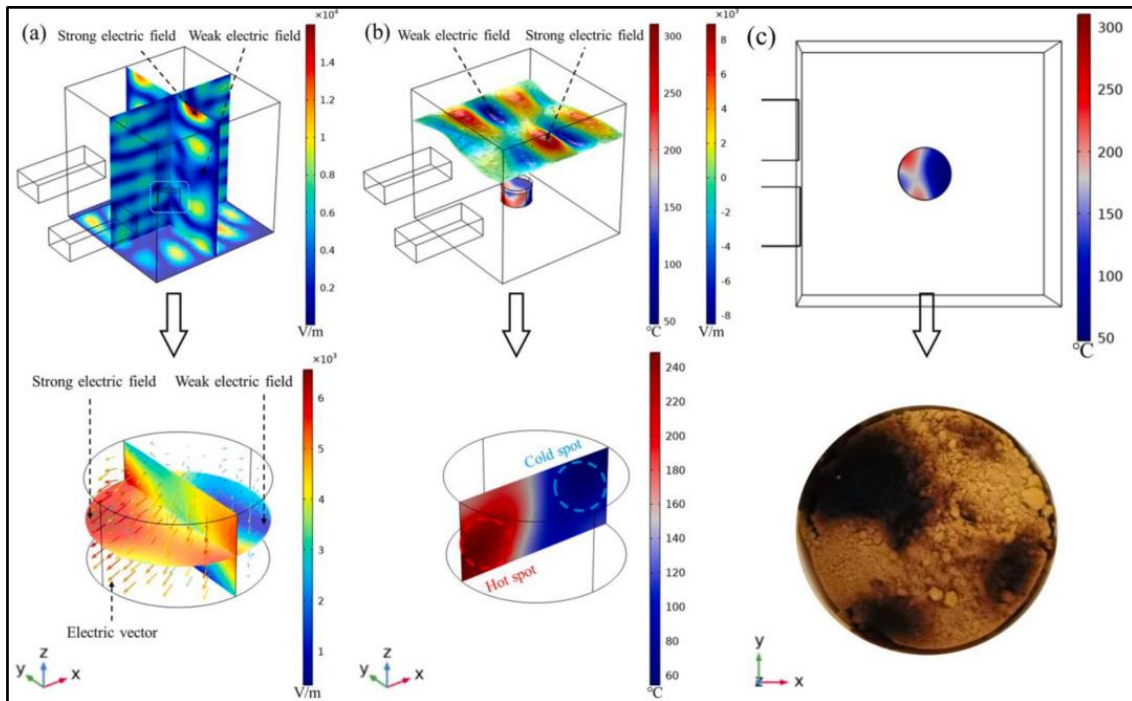
Tal como se puede visualizar, los resultados de simulación predicen con gran precisión los resultados experimentales, sin embargo, la raíz del error cuadrático medio crece a medida que aumenta la potencia. Asimismo, el error relativo máximo llega hasta un valor de 10% para la simulación con potencia de entrada de 1500 W.

Posterior a ello, el estudio exhibe la relación de distribución de campo eléctrico en condiciones estacionarias con la distribución de temperatura tras simular por 360 segundos. Es así como, se presenta la formación de zonas calientes a partir de mayor acumulación de campo eléctrico en por ejemplo la zona izquierda de la muestra. Asimismo, en la figura 56 se presenta el calentamiento real de la porción de tallo de tabaco.

Ahora bien, tras obtener las condiciones y resultados de simulación del artículo validado con resultados experimentales y verificado en una revista de prestigio, se procede a realizar la simulación en el software ANSYS Electronics que cuenta con las herramientas HFSS e Icepack para obtener distribuciones de campo eléctrico y temperatura respectivamente. De manera que, ello también permita corroborar que este software logra modelar satisfactoriamente el fenómeno de calentamiento de productos con microondas, y así desarrollar y optimizar prototipos de deshidratación basados en el aprovechamiento de la energía de microondas.

Figura 56:

Distribución de campo eléctrico y temperatura tras simulación y validación experimental

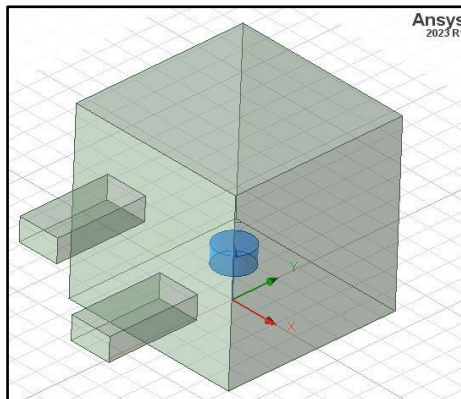


Nota. Tomado de Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study, por (Li, y otros, 2023), Energy

3.2.3 Pasos de simulación propia

1) Geometría. Se dibuja la geometría del prototipo mostrado en el artículo mencionado, tal como se puede ver en la figura 57.

Figura 57:
Geometría del artículo en HFSS



2) Material y condiciones de frontera. Se asigna el material a la estructura interna como aire tal como se ve en la figura 58 junto con sus propiedades. Luego, se procede a seleccionar las caras externas a excepción de las entradas para asignarles la condición de finite conductivity con las propiedades de acero inoxidable que es un material no magnético y adecuado para una cavidad de microondas tal como en las figuras 59 y 60 respectivamente.

Figura 58:
Selección del material aire y sus propiedades

Material Name
air

Properties of the Material

| Name | Type | Value | Units |
|-------------------------------|------------|-----------|-------------|
| Relative Permittivity | Simple | 1.0006 | |
| Relative Permeability | Simple | 1.0000004 | |
| Bulk Conductivity | Simple | 0 | siemens/m |
| Dielectric Loss Tangent | Simple | 0 | |
| Magnetic Loss Tangent | Simple | 0 | |
| Electric Coercivity | Vector | | |
| · Magnitude | Vector Mag | 0 | |
| Magnetic Coercivity | Vector | | |
| · Magnitude | Vector Mag | 0 | A_per_meter |
| Thermal Conductivity | Simple | 0.0261 | W/m-C |
| Magnetic Saturation | Simple | 0 | tesla |
| Lande G Factor | Simple | 2 | |
| Delta H | Simple | 0 | A_per_meter |
| · Measured Frequency | Simple | 9.4e+09 | Hz |
| Core Loss Model | | None | w/m^3 |
| Mass Density | Simple | 1.1614 | kg/m^3 |
| Composition | | Solid | |
| Specific Heat | Simple | 1005 | J/kg-C |
| Thermal Expansion Coefficient | Simple | 0.00333 | 1/C |

Materials | Material Filters

Search Parameters
 Search by Name

Search Criteria
 by Name by Property

| Name | Location | Origin |
|------|----------|-----------|
| air | Project | Materials |

Figura 59:
Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa sin considerar entradas

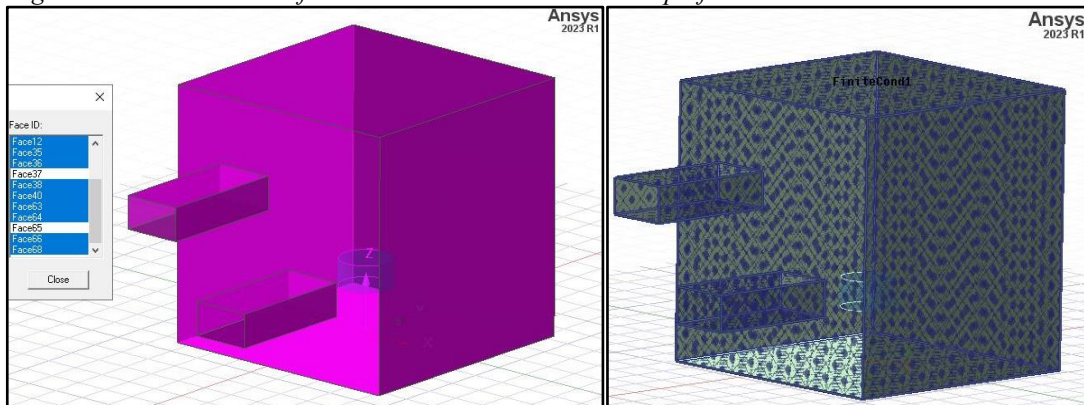
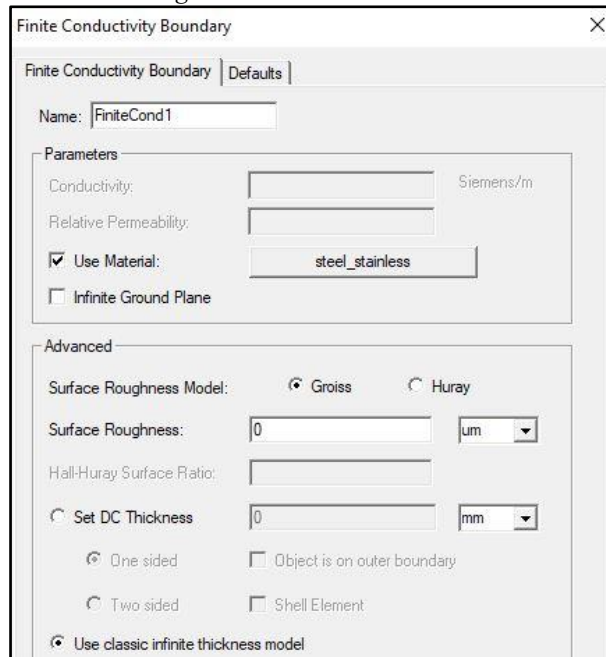


Figura 60:
Configuración de condición de frontera de material metálico no magnético acero inoxidable

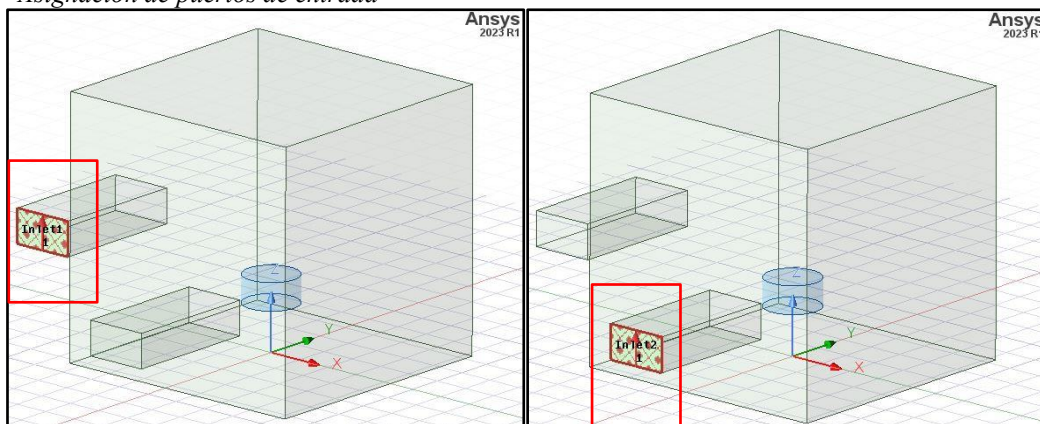


3) Entradas y potencia. Se configuran los puertos de entrada donde se ubican las guías de onda con sus respectivos magnetrones, tal como se observa en la figura 62. Asimismo, se configuran las potencias de entrada que suministra cada magnetrón. Sirva de ejemplo, repartir equitativamente 500 W entre las dos entradas tal como se muestra en la figura 61.

Figura 61:
Asignación de entradas con potencias de 250 W por cada magnetrón

| | Source | Type | Magnitude | Unit | Phase | Unit |
|---|----------|------|-----------|------|-------|------|
| 1 | Inlet1:1 | Port | 250 W | | 0 deg | |
| 2 | Inlet2:1 | Port | 250 W | | 0 deg | |

Figura 62:
Asignación de puertos de entrada



4) Configuración del solucionador y frecuencia de operación. Aquí se configura tal como en la figura 63, la frecuencia de trabajo, en este caso con 2.45 GHz. Asimismo, se establece como parámetros de convergencia que el software realice 15 iteraciones con un delta

S máximo de 0.01 para obtener una simulación con resultados adecuados. El número de iteraciones correcto se determina hasta que la simulación converge. La magnitud del delta S máximo fue recomendado por el personal técnico de ANSYS como valor Adicional a ello, se coloca el rango de frecuencias en el cual realmente opera el magnetrón, que es $\pm 0.05 \text{ GHz}$ tal como en la figura 64. Se ha optado por el tipo discreto para una simulación sin elevada carga computacional al realizar el análisis con frecuencias.

Figura 63:
Configuración de solución adaptativa con frecuencia de operación

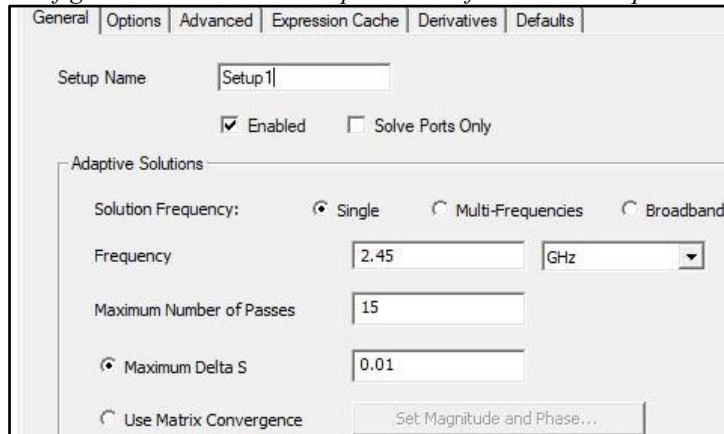
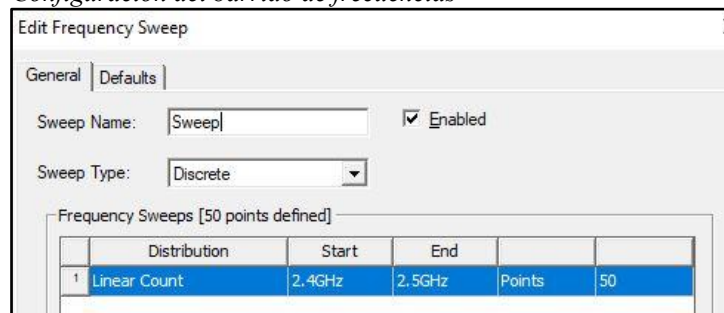
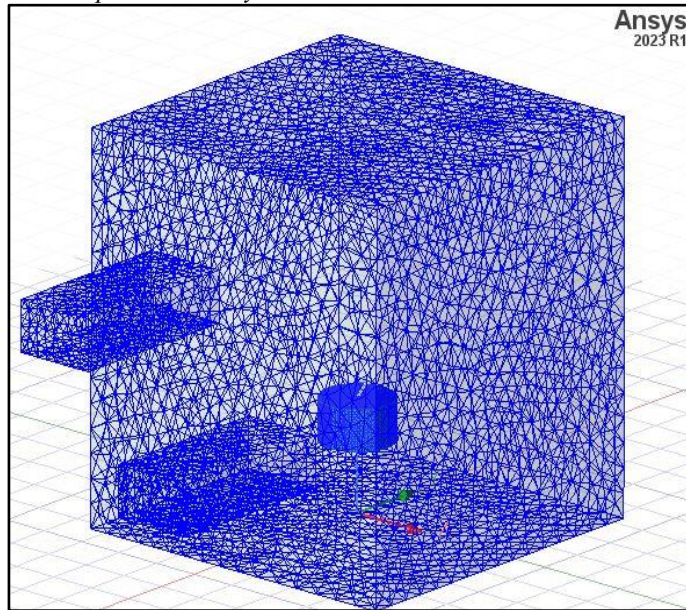
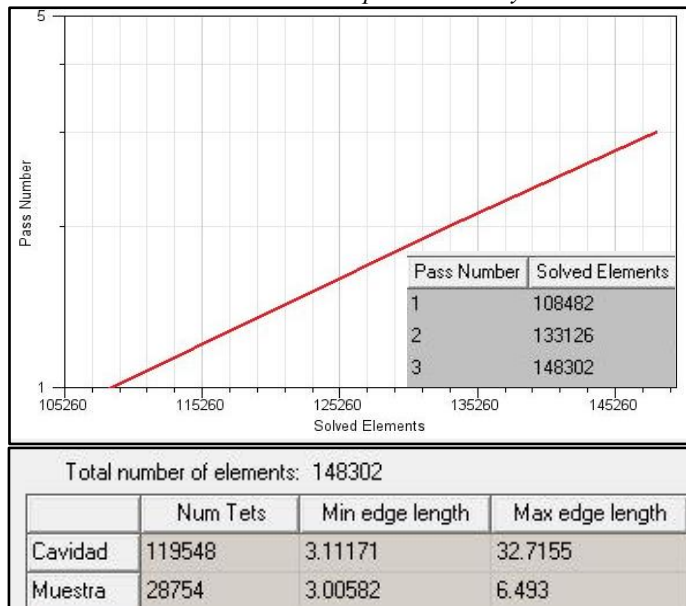


Figura 64:
Configuración del barrido de frecuencias



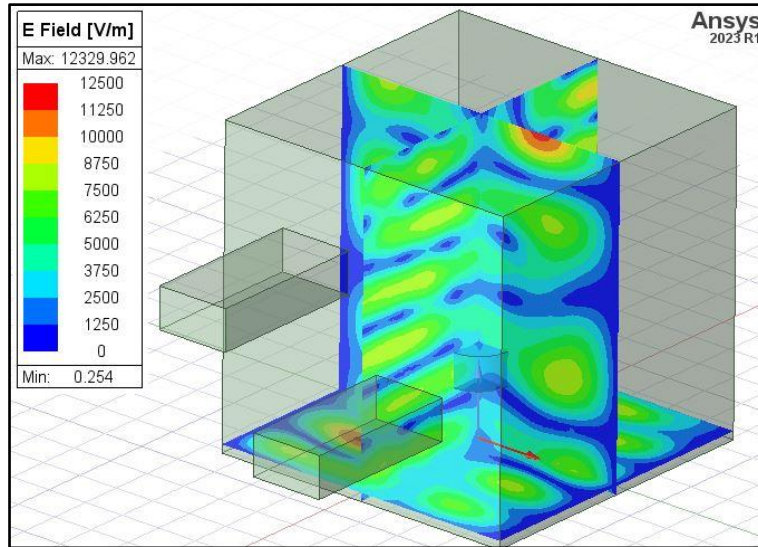
5) Mallado y número de elementos. Se puede apreciar en la figura 65 y 66 que el software adaptativo tras cumplir con los parámetros de convergencia determina que el mejor mallado para obtener una alta precisión en la distribución de campo eléctrico debe ser con 148302 elementos repartidos en 20% y 80% para la muestra de tallo de tabaco y cavidad respectivamente.

Figura 65:*Mallado para cavidad y muestra de tallo de tabaco***Figura 66:***Número de elementos en mallado para cavidad y muestra*

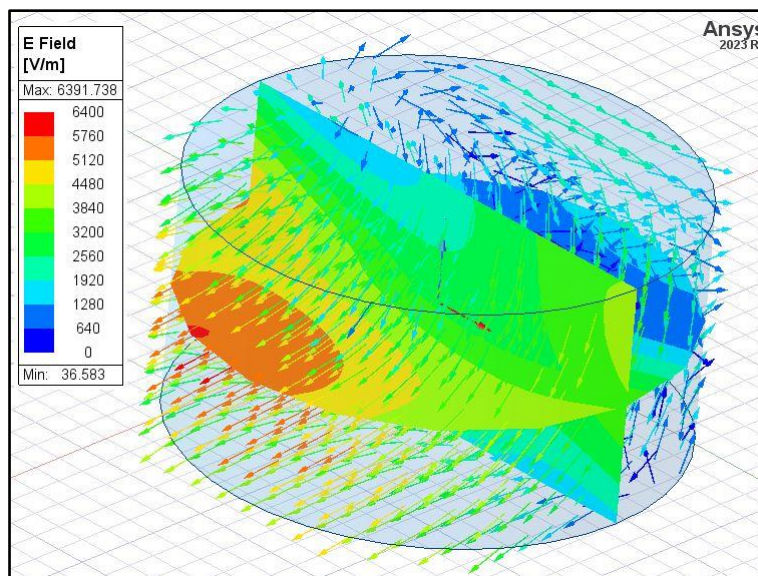
6) Resultados. Tras ejecutar el análisis, se obtienen las siguientes distribuciones de campo eléctrico en los planos XY, XZ y YZ:

Figura 67:

Distribución planar de la simulación de campo eléctrico planos XY, XZ y YZ para prototipo de artículo en ANSYS Electronics

**Figura 68:**

Distribución de campo eléctrico en plano XZ y vectorial para muestra de tabaco en HFSS - ANSYS Electronics

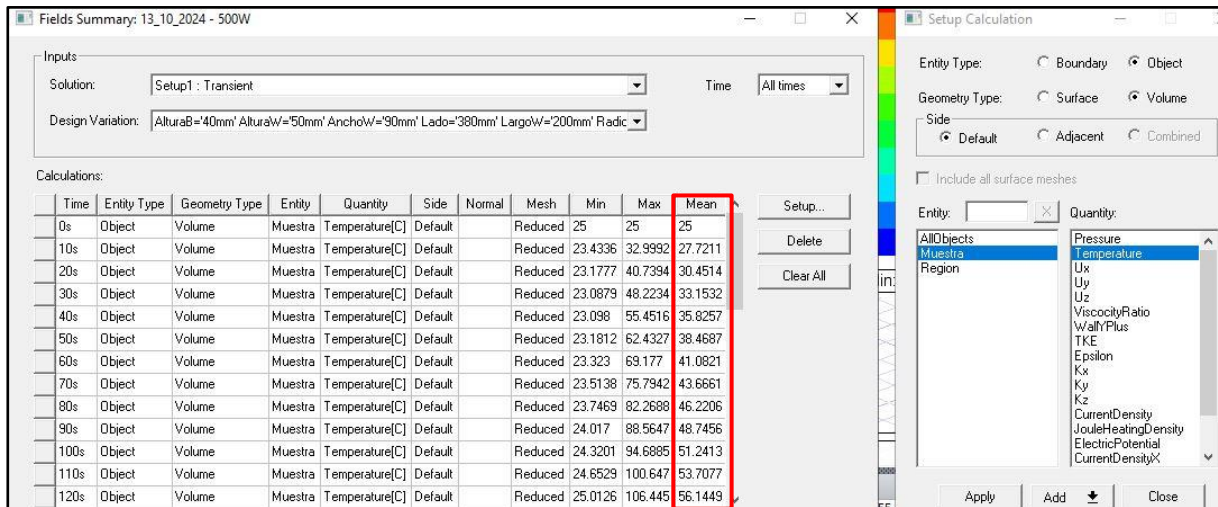


De las figuras 67 y 68 se puede visualizar como los resultados de campo eléctrico son similares a los logrados en el artículo de (Li, y otros, 2023) tanto en la forma de los patrones como en valores numéricos observados en la figura 56. Sirva de ejemplo que, de la simulación realizada se ha obtenido un máximo de 6391.738 V/m en tanto que en la investigación el máximo es de 6000 V/m . De modo que, ello valida el uso de la herramienta HFSS del software ANSYS Electronics para la simulación de otros prototipos.

Por otro lado, se procede a obtener los resultados de temperatura promedio en el volumen de la muestra de tabaco tras diferentes potencias. Por ejemplo, tras aplicar 500 W como se muestra en la figura 69.

Figura 69:

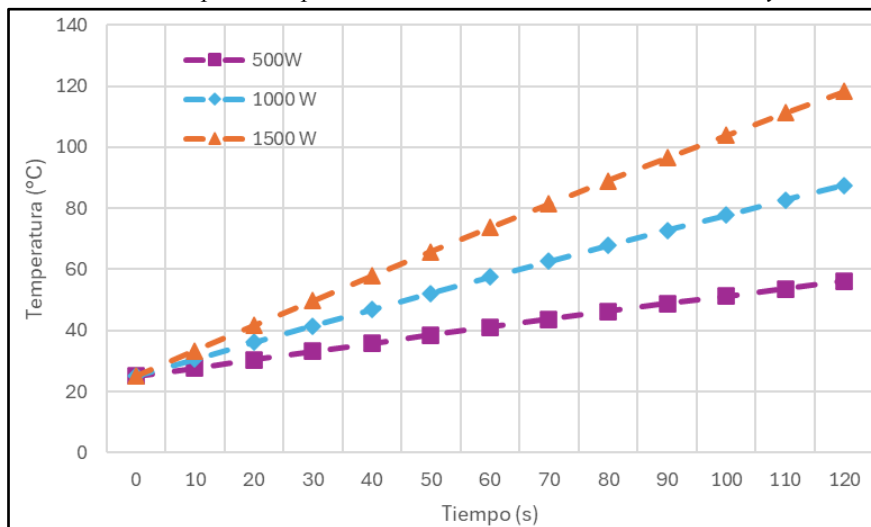
Resultados de temperatura en muestra de tabaco tras 120 s a 500 W y 2.45 GHz.



De forma que, se obtiene la siguiente gráfica que contienen los valores de temperatura promedio en el volumen de la muestra cada 10 segundos para 500, 1000 y 1500 W tal y como se visualiza en la figura 70.

Figura 70:

Resultados de temperatura promedio en tabaco tras 120 s a 500, 1000 y 1500 W



Al aplicar la ecuación 29 referida a la métrica RMSE entre los resultados incluidos en esta gráfica con los de la figura 56, tal como se observa en la figura 71, es posible determinar que los valores RMSE para 500, 1000 y 1500 W es de aproximadamente 2.7, 3.7 y 6.2 °C respectivamente. En tanto que, tras aplicar el error relativo máximo con la ecuación 30 para cada potencia, se obtiene valores de 7.96, 6.88, 9.65%. De ahí que, se puede afirmar que la precisión para las pruebas de 500 y 1000 W es aceptable, mientras que, para 1500 W el modelo simulado empieza a ser relativamente impreciso. Cabe mencionar que, dichas diferencias podrían justificarse en base a que la geometría se ha construido suponiendo la posición de las guías de onda dado que no se especifican en el artículo.

Figura 71:

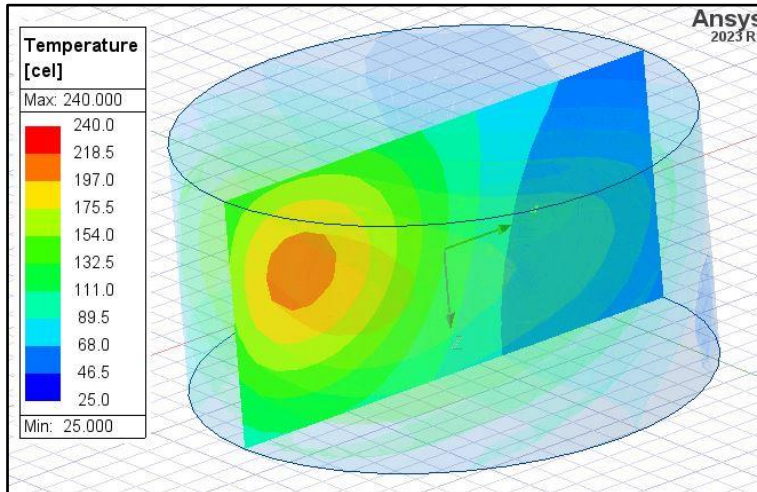
Resultados de temperatura promedio en tabaco tras 120 s a 500, 1000 y 1500 W

| 500 W | | | | 1000 W | | | | 1500 W | | | |
|------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Tiempo (s) | Temperaturas_ articulo (°C) | Temperaturas_ ansys (°C) | Diferencias al cuadrado | Tiempo (s) | Temperaturas_ articulo (°C) | Temperaturas_ ansys (°C) | Diferencias al cuadrado | Tiempo (s) | Temperaturas_ articulo (°C) | Temperaturas_ ansys (°C) | Diferencias al cuadrado |
| 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 25 | 25 | 0 |
| 10 | 27 | 27.7211 | 0.51998521 | 10 | 31 | 30.531 | 0.219961 | 10 | 33.5 | 33.3281 | 0.02954961 |
| 20 | 31 | 30.4514 | 0.30096196 | 20 | 36.5 | 36.0418 | 0.20994724 | 20 | 43 | 41.6085 | 1.93627225 |
| 30 | 34 | 33.1532 | 0.71707024 | 30 | 43 | 41.491 | 2.277081 | 30 | 52 | 49.7895 | 4.88631025 |
| 40 | 36 | 35.8257 | 0.03038049 | 40 | 48 | 46.8764 | 1.26247696 | 40 | 59.5 | 57.866 | 2.669956 |
| 50 | 39 | 38.4687 | 0.28227969 | 50 | 54 | 52.1966 | 3.25225156 | 50 | 69 | 65.834 | 10.023556 |
| 60 | 42.5 | 41.0821 | 2.01044041 | 60 | 60 | 57.4505 | 6.49995025 | 60 | 78 | 73.6903 | 18.5735141 |
| 70 | 45 | 43.6661 | 1.77928921 | 70 | 65.5 | 62.6371 | 8.19619641 | 70 | 86 | 81.4321 | 20.8657104 |
| 80 | 50 | 46.2206 | 14.2838644 | 80 | 72 | 67.7555 | 18.0157803 | 80 | 95 | 89.057 | 35.319249 |
| 90 | 53 | 48.7456 | 18.0999194 | 90 | 77 | 72.8051 | 17.597186 | 90 | 105 | 96.563 | 71.182969 |
| 100 | 55 | 51.2413 | 14.1278257 | 100 | 84 | 77.7852 | 38.623739 | 100 | 113 | 103.949 | 81.920601 |
| 110 | 58 | 53.7077 | 18.4238393 | 110 | 89 | 82.6954 | 39.7479812 | 110 | 121 | 111.213 | 95.785369 |
| 120 | 61 | 56.1449 | 23.571996 | 120 | 94 | 87.5355 | 41.7897603 | 120 | 131 | 118.355 | 159.896025 |
| | | RMSE_500W | 2.6911229 | | | RMSE_1000W | 3.69711229 | | | RMSE_1500W | 6.2208649 |

Así también, se plotea la distribución de temperatura en la muestra con la intención de realizar una comparación con la distribución de temperatura evidenciada en el artículo y referenciada en la figura 72 tras calentar durante 360 s.

Figura 72:

Distribución de temperatura en muestra de tabaco tras 360 s a 500 W



De esta distribución de temperatura es posible confirmar la formación de puntos calientes y fríos en las zonas izquierda y derecha respectivamente, tal como lo que evidenciado en el artículo.

Capítulo 4

Casos, resultados y análisis

4.1 Caso 1: Simulación y pruebas del microondas comercial LG modelo MH6536GIS

Este primer caso considera la simulación de una muestra de papa dentro del horno microondas comercial LG modelo MH6536GIS con la finalidad de obtener resultados de simulación y compararlos con mediciones experimentales. De ahí que, se logre conocer si estos se correlacionan con la intención de obtener la validación de un adecuado modelo base para luego realizar modificaciones que optimicen el proceso de deshidratación de alimentos.

1) Geometría. Para las geometrías se establecen algunas consideraciones con la finalidad de reducir la carga computacional requerida:

- La cavidad del horno microondas comercial se ha simplificado a una cavidad netamente rectangular donde aproximadamente se conserva el volumen. Es así como, se toman las medidas reales de la cavidad para luego realizar su geometría en la herramienta HFSS del software ANSYS Electronics.
- La antena del magnetrón junto con la guía de ondas trapezoidal que forman parte del horno microondas comercial se simplifican a una guía de ondas rectangular acoplada con el tramo trapezoidal. Al primer elemento se le ha asignado una longitud que es definida por las dimensiones de la cavidad y los parámetros de simulación, entre los cuales se destacan la frecuencia de trabajo y el material utilizado.

Se ha determinado para las condiciones de simulación que la cavidad está compuesta por aire. Al asignarle este tipo de material, se asume que el entorno de trabajo es similar al vacío, dado que, tanto la permitividad como la permeabilidad son muy cercanas a las de este. Para el caso de la simulación en estas condiciones, la expresión para determinar la longitud de onda analíticamente alude a la ecuación 4. En base a lo mencionado, se detallan las dimensiones empleadas y la longitud de onda obtenida en la tabla 6:

Tabla 6:
Dimensión de los parámetros para la determinación de la longitud de onda

| Parámetros | Símbolos | Magnitud | Unidades de dimensionamiento |
|---------------------------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| Velocidad de la luz en el vacío | c | 3×10^8 | $\frac{m}{s}$ |
| Frecuencia | f | 2.45×10^9 | Hz |
| Longitud de onda | λ | 0.122 | m |

Para determinar la longitud de trabajo de la guía de ondas en el modelado realizado en HFSS, se ha seleccionado una medida de 35 mm. Es importante destacar que, según el manual de ANSYS, para asegurar la precisión de las simulaciones, las secciones determinadas como puertos deben cumplir con una uniformidad de al menos la tercera parte de la longitud deseada. Esto garantiza que las ondas electromagnéticas se propaguen de manera eficiente a través de los puertos sin generar distorsiones que afecten los resultados.

En este caso, al usar una longitud de guía de onda de 35 mm, se asegura que los puertos tengan una dimensión adecuada para mantener esta uniformidad. La geometría trapezoidal, por su parte, conserva sus dimensiones originales.

- La forma de la muestra de papa a calentar dentro de la cavidad de microondas es cilíndrica con la intención de corroborar si al interior se genera mayor calentamiento respecto al exterior debido a la interacción con microondas.
- La muestra de papa se deja inamovible, es decir, no cuenta con la rotación del motor que gira los productos dentro del modelo real del microondas comercial. Es así como, en el experimento real tampoco se aplica dicho movimiento rotatorio.

De modo que, en la tabla 7 se resume las medidas de las geometrías del caso 1 acorde las consideraciones realizadas. Mientras que, en la tabla 8 se puede apreciar la geometría de la simulación y de la realidad.


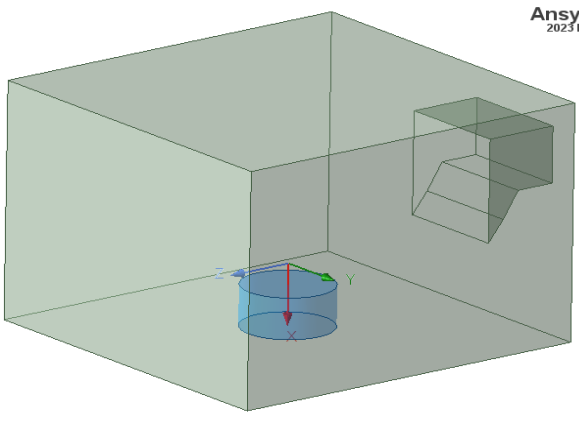
Tabla 7:

Dimensiones de las geometrías de caso 1

| Geometría | Largo [mm] | Ancho [mm] | Altura [mm] | Radio [mm] |
|-----------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Cavidad de microondas | 335 | 320 | 230 | – |
| Guía de ondas | 100 | 35 | 55 | – |
| Muestra de papa | – | – | 40 | 40 |

Tabla 8:

Geometrías del caso 1

| Geometrías reales | Geometrías simuladas |
|---|--|
|  |  |

2) Material y condiciones de frontera. Aquí también se establecen algunas consideraciones con la finalidad de realizar una correcta simulación:

- El material dentro de la cavidad del horno microondas es aire y se selecciona tal como en los ejemplos de verificación del capítulo tres.
- Se seleccionan las caras externas a excepción de la entrada para asignarle la condición de frontera finite conductivity con las propiedades del acero inoxidable que es un material no magnético utilizado en el horno microondas comercial. Además, se le asigna un espesor de

1.5 mm con la intención de conseguir un modelo más realista. Ello se evidencia en las figuras 73 y 74.

- El material para la muestra de papa se asignará como agua de acuerdo con lo manifestado en el marco teórico.

Figura 73:

Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa para caso 1

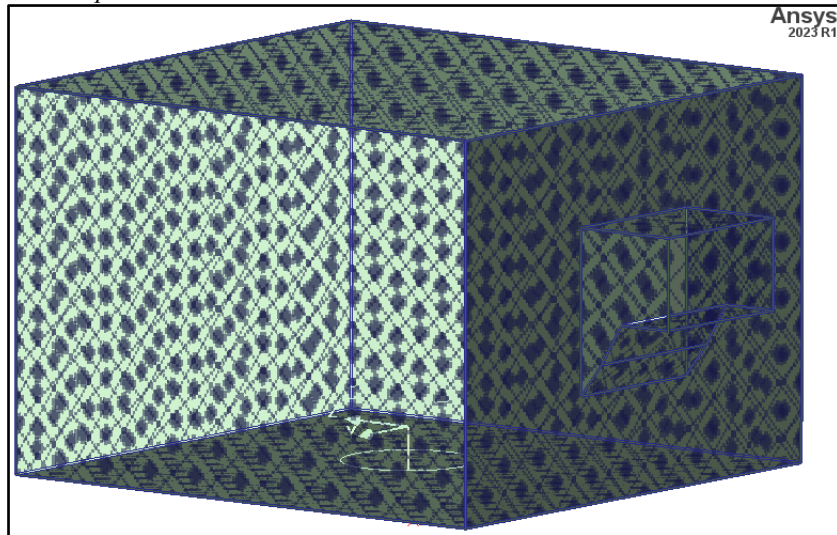


Figura 74:

Configuración de condición de frontera de material metálico no magnético acero inoxidable con espesor para caso 1

Finite Conductivity Boundary | Defaults

Name:

Parameters

Conductivity: Siemens/m

Relative Permeability:

Use Material:

Infinite Ground Plane

Advanced

Surface Roughness Model: Groiss Huray

Surface Roughness:

Hall-Huray Surface Ratio:

Set DC Thickness

One sided Object is on outer boundary

Two sided Shell Element

Use classic infinite thickness model

3) Entradas y potencia. Se configura el puerto de entrada donde se ubica la guía de onda rectangular con su respectivo magnetrón tal como en la figura 75. Asimismo, se configura la potencia de entrada como 1000 W como en la figura 76.

Figura 75:
Asignación de puertos de entrada para caso 1

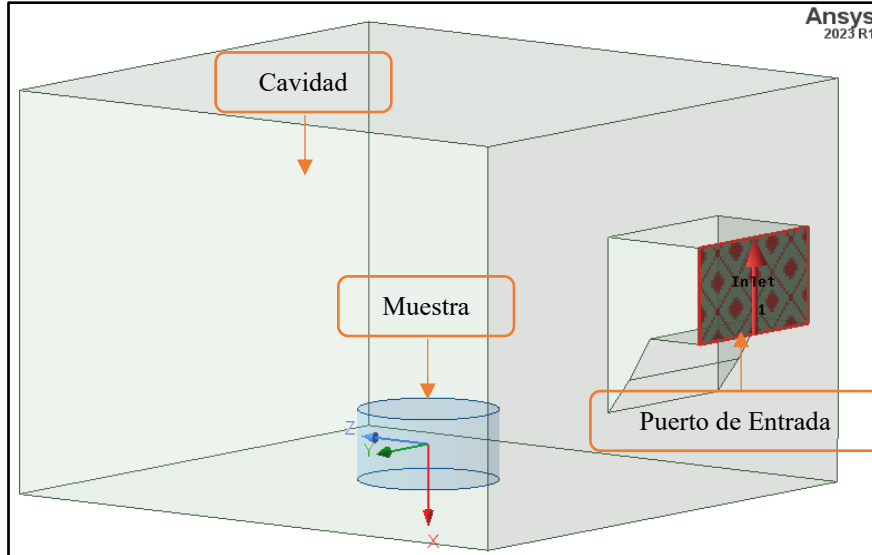


Figura 76:
Asignación de entrada con potencia de 1000 W

[HFSSDesign1] Edit post process sources

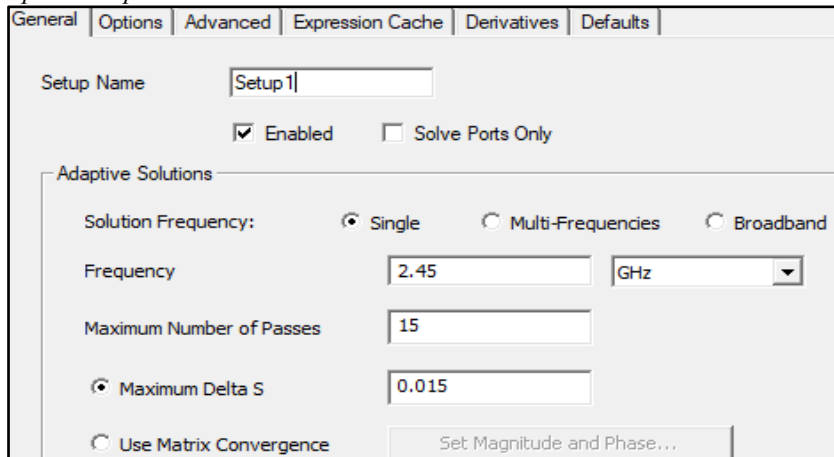
Spectral Fields | Source Context

| | Source | Type | Magnitude | Unit | Phase | Unit |
|---|---------|------|-----------|------|-------|------|
| 1 | Inlet:1 | Port | 1000 | W | 0 | deg |

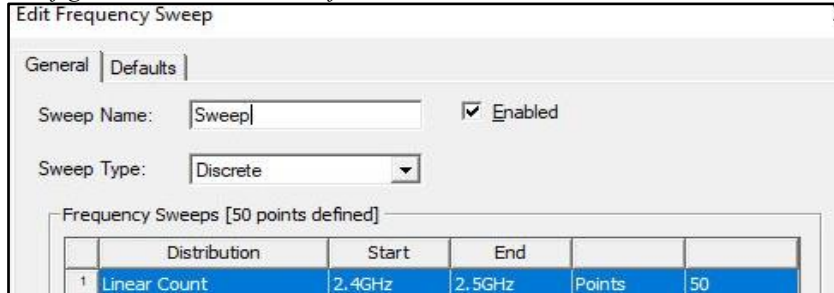
4) Configuración del solucionador y frecuencia de operación. Similar a lo realizado en el capítulo 3, se configura la frecuencia de trabajo en 2.45 GHz, 15 iteraciones y un barrido de frecuencias con ± 0.05 GHz de tipo discreto tal como en la figura 77 y 78. El número de iteraciones correcto se determina hasta que la simulación converge. No obstante, suficiente con un delta S máximo de 0.015 para una simulación adecuada.

Figura 77:

Configuración de solución adaptativa del software con frecuencia de operación para caso 1

**Figura 78:**

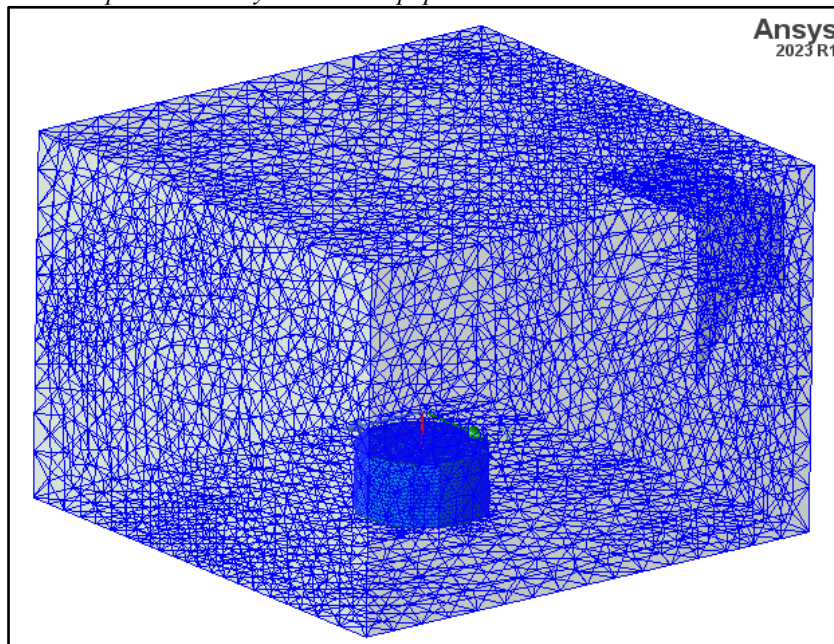
Configuración del barrido de frecuencias



6) Mallado y número de elementos. En la figura 79 se plotea el mallado conseguido donde se denota un mayor refinamiento para la muestra a comparación de la cavidad.

Figura 79:

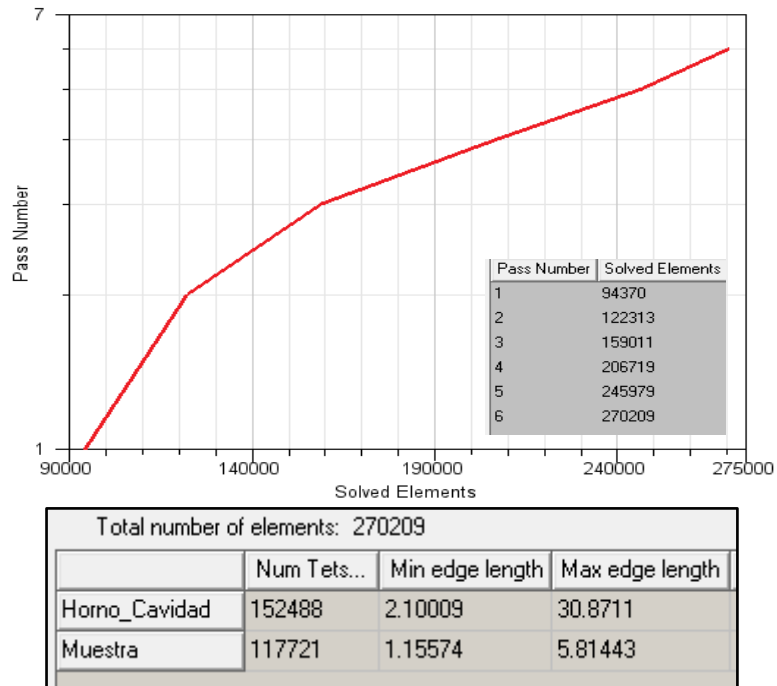
Mallado para cavidad y muestra de papa en caso 1



En la figura 80 se puede apreciar que, el software adaptativo tras realizar 6 iteraciones cumple con los parámetros de convergencia. De manera que, determina que el mejor malla para obtener una alta precisión en la distribución de campo eléctrico se alcanza con 270,209 elementos repartidos en 44% y 56% para la muestra de papa y cavidad respectivamente.

Figura 80:

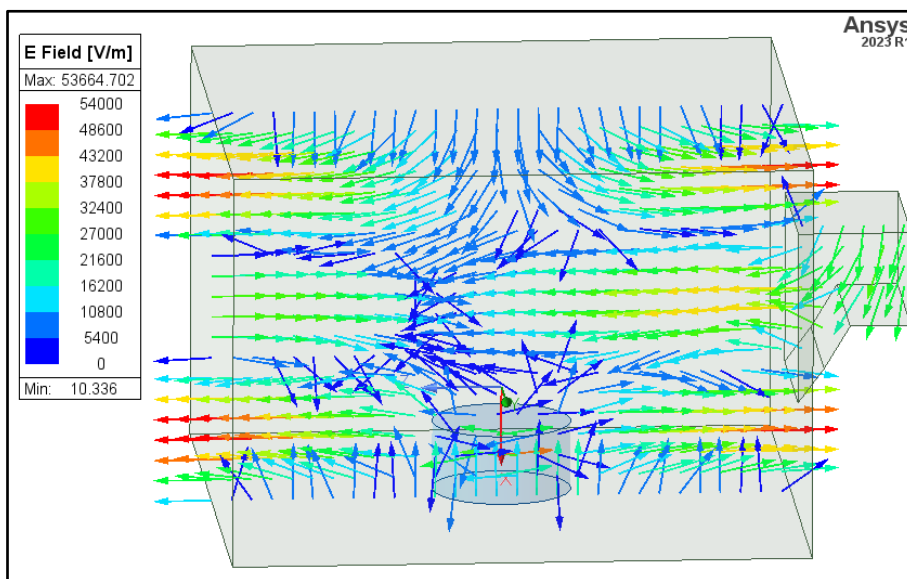
Número de elementos en malla para cavidad y muestra de papa en caso 1



7) Resultados. Tras ejecutar el análisis, se obtiene la distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ:

Figura 81:

Distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ de elementos para caso 1 en HFSS - ANSYS Electronics



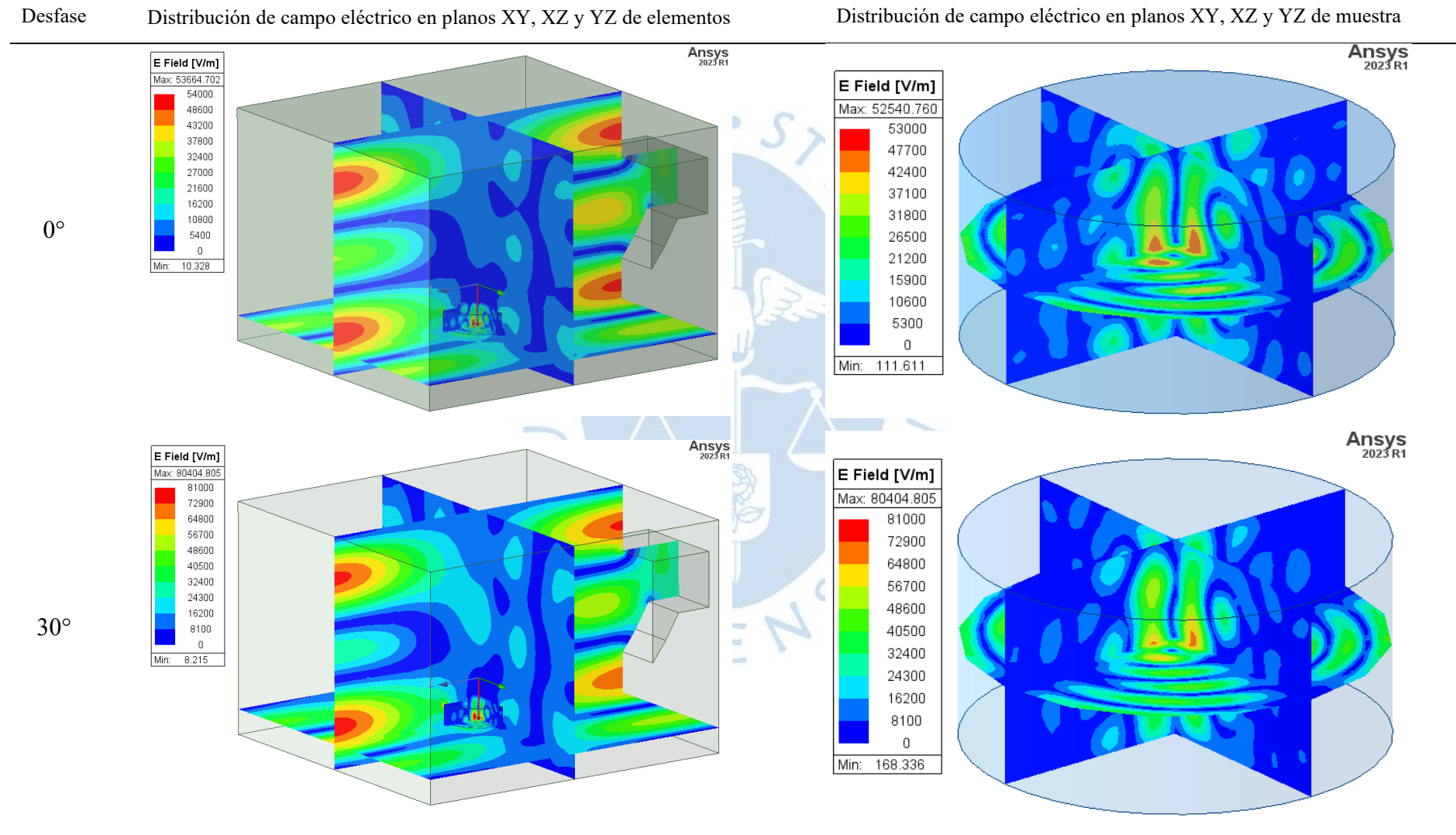
En la figura 81 se puede visualizar el ingreso de las microondas por el puerto de entrada y su propagación en la cavidad del horno microondas comercial. Asimismo, es posible observar que las microondas manifestadas en forma de vectores relativamente grandes aparentan escaparse de la cavidad. De ahí que, en el caso 2 que es una modificación del caso 1, se colocará un objeto fuera del horno microondas para evaluar si realmente las microondas están contenidas dentro de la cavidad o se fugan.

Por otro lado, se obtienen las siguientes distribuciones de campo eléctrico en los planos XY, XZ y YZ, para diferentes desfases en el campo eléctrico de las microondas mostradas en la tabla 9.

La justificación para plotear la distribución de campo eléctrico según su desfase es similar a una onda eléctrica sinusoidal donde es importante ver que, por cada ángulo existe un valor de tensión eléctrica. Sirva de ejemplo que, a 0° y 90° el valor de tensión es 0 y 311 V respectivamente, sin embargo, su valor eficaz es 220 V para alimentar una carga como por ejemplo un foco que también va disipando su energía en forma de calor, es decir, incrementando su temperatura. De ahí que, en las microondas también habrá un valor eficaz que permitirá el incremento de temperatura de por ejemplo la muestra colocada.



Tabla 9:
Distribuciones de campo eléctrico para caso 1 en HFSS – ANSYS Electronics

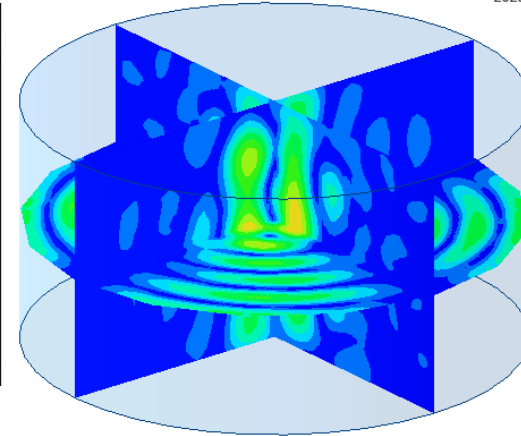
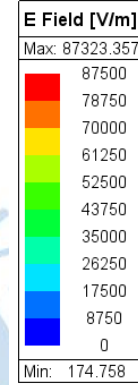
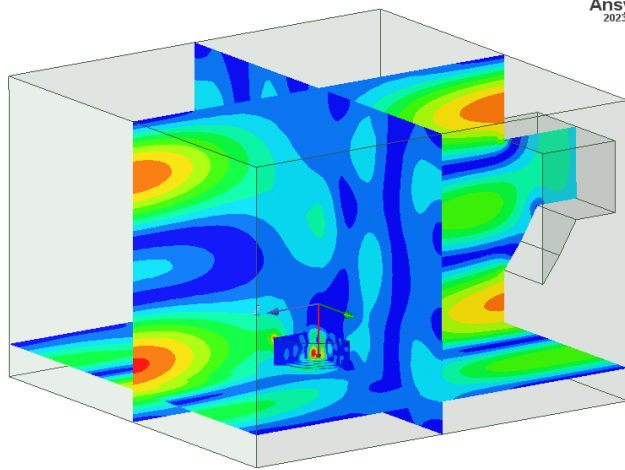
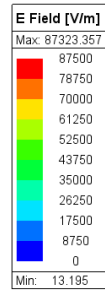


Desfase

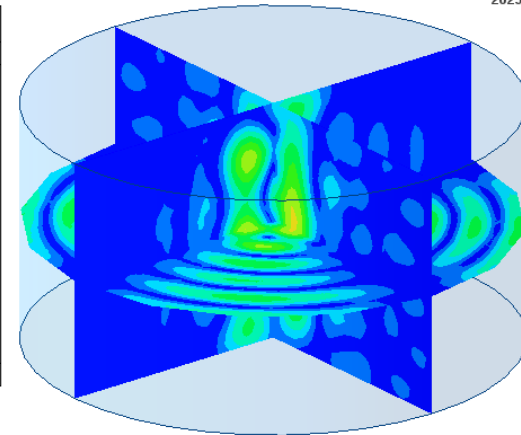
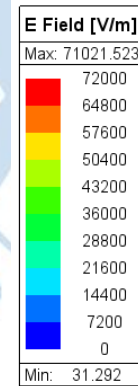
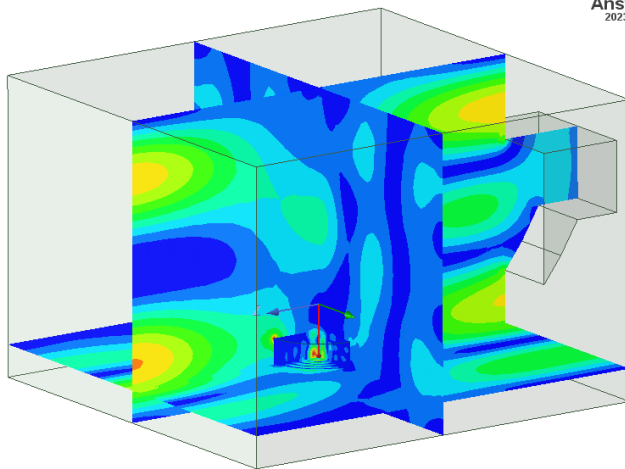
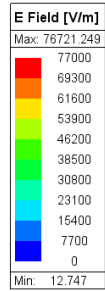
Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra

60°



90°

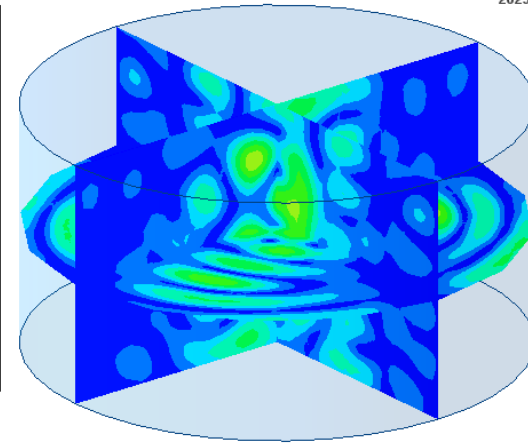
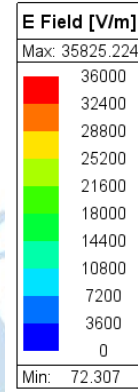
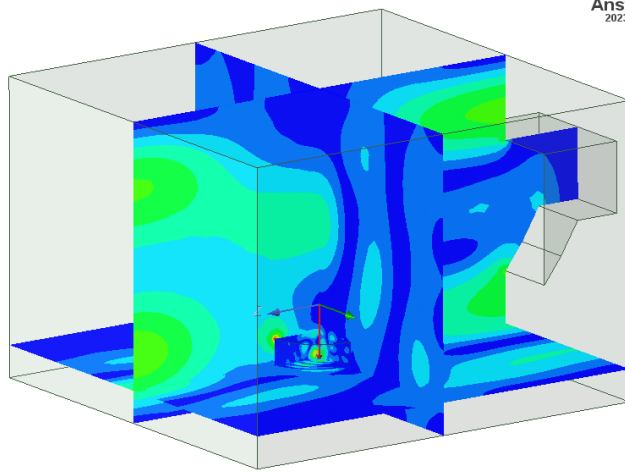
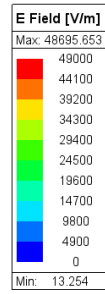


Desfase

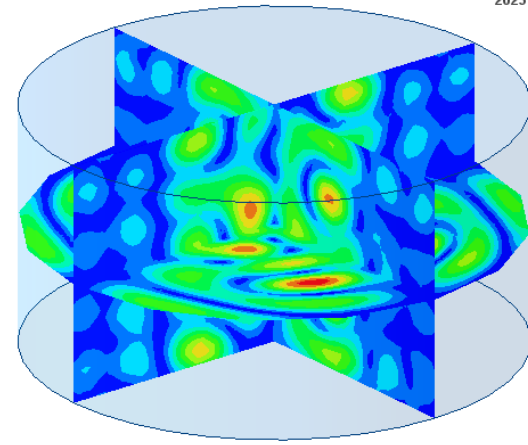
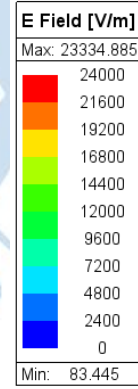
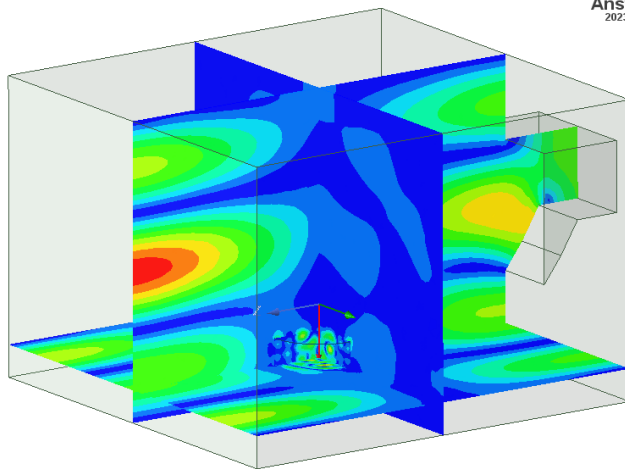
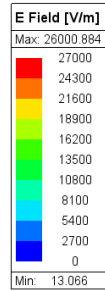
Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra

120°



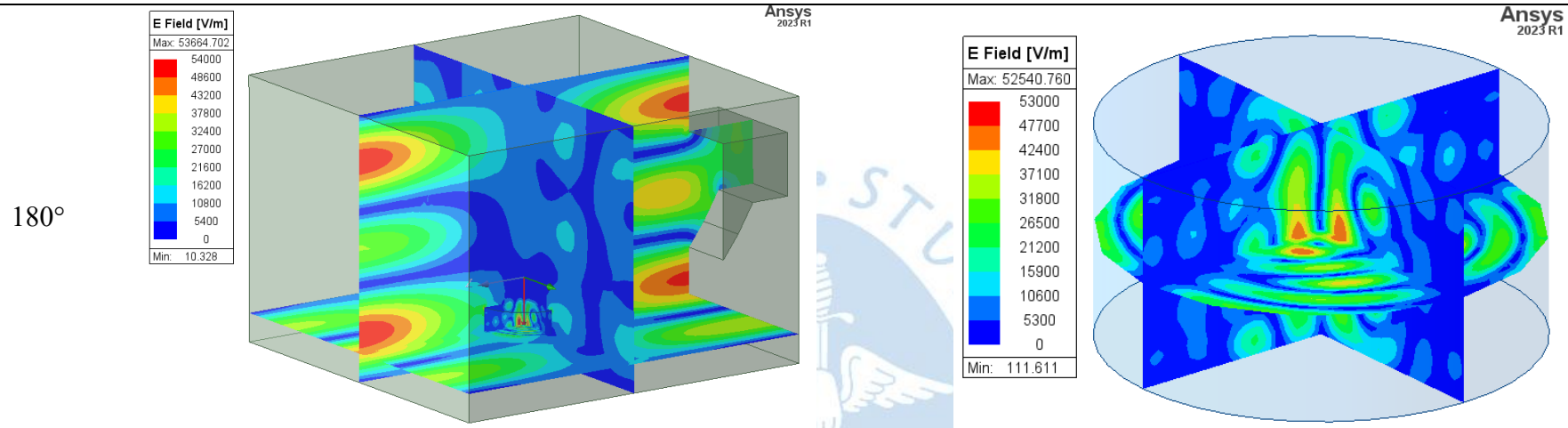
150°



Desfase

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra



De las figuras de la tabla 9, es posible apreciar que el desfase de las microondas provoca intervalos diferentes de valores de campo eléctrico mayores y menores por ejemplo para 60° y 150° respectivamente. Sin embargo, en todos los desfases el patrón de campo eléctrico es similar y la mayor concentración de este ocurre en los cuatro extremos del plano XZ y en el centro de la muestra cilíndrica de papa. De modo que, ello indicaría que las microondas calientan con mayor intensidad las moléculas de agua que forman parte de los alimentos en dichas posiciones.

Ahora bien, se procede a obtener los resultados de temperatura promedio en la muestra de papa, tanto en su volumen como en su superficie externa para un total de 150 segundos a 1000 W y 2.45 GHz.

Figura 82:

Resultados de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 1

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.2394 | 56.3252 | 30.3792 |
| 20s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.5453 | 86.2023 | 35.7156 |
| 30s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.9238 | 114.765 | 41.0224 |
| 40s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.376 | 142.134 | 46.3105 |
| 50s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.9026 | 168.416 | 51.5859 |
| 60s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.5031 | 193.704 | 56.8522 |
| 70s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.1762 | 218.081 | 62.1111 |
| 80s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.9149 | 241.619 | 67.3635 |
| 90s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.7103 | 264.384 | 72.61 |
| 100s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 30.5756 | 286.431 | 77.8508 |
| 110s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.482 | 307.811 | 83.0858 |
| 120s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 32.3636 | 328.569 | 88.3151 |
| 130s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 33.2934 | 348.746 | 93.5384 |
| 140s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 34.2713 | 368.377 | 98.7557 |
| 150s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 35.2977 | 387.496 | 103.967 |

Figura 83:

Resultados de temperatura promedio en superficie externa de muestra tras 150 s para caso 1

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.2394 | 39.6277 | 28.0673 |
| 20s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.5453 | 51.9189 | 31.0044 |
| 30s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.9238 | 62.647 | 33.8667 |
| 40s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.376 | 72.3577 | 36.7051 |
| 50s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.9026 | 81.3718 | 39.5478 |
| 60s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.5031 | 89.8809 | 42.4102 |
| 70s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.1762 | 98.0025 | 45.3003 |
| 80s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.9149 | 105.81 | 48.222 |
| 90s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.7103 | 113.353 | 51.1771 |
| 100s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 30.5756 | 120.663 | 54.1657 |
| 110s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.482 | 127.765 | 57.1875 |
| 120s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 32.3636 | 134.676 | 60.2416 |
| 130s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 33.2934 | 141.411 | 63.3269 |
| 140s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 34.2713 | 147.981 | 66.4421 |
| 150s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 35.2977 | 154.396 | 69.5861 |

Tanto en la figura 82 como 83 se han enmarcado las medidas de temperatura promedio en volumen y superficie externa respectivamente a 90 segundos. Dicho tiempo se ha considerado así dado que es adecuado para realizar la prueba real con el microondas comercial sin el riesgo de quemar el almidón de la papa tras la formación de zonas calientes.

De los resultados mostrados en dichas figuras, se obtienen las siguientes gráficas mostradas en las figuras 84 y 85 que contienen los valores de temperatura promedio en el volumen y superficie externa de la muestra cada 10 segundos.

Figura 84:

Gráfica de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 1

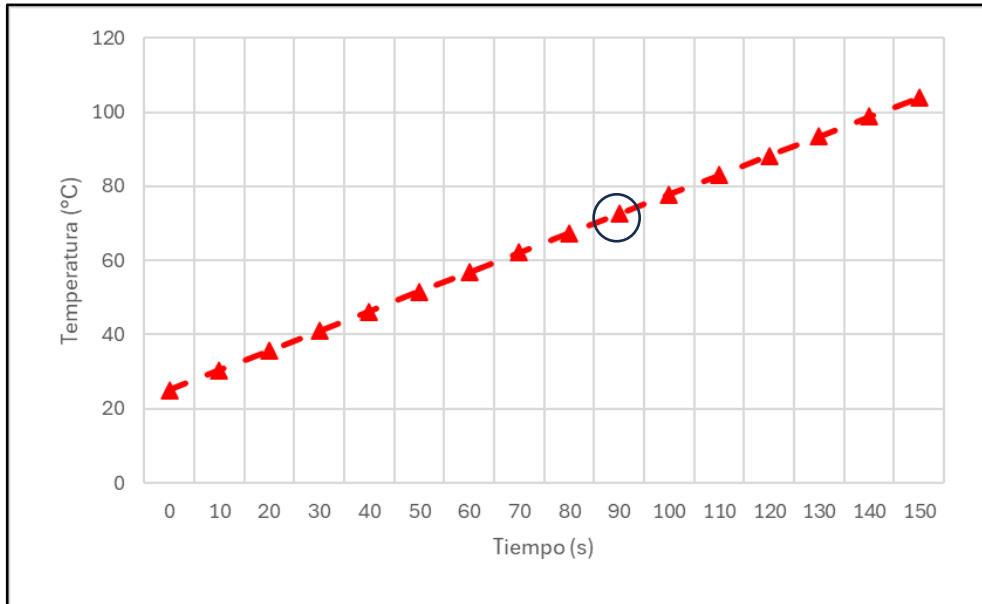
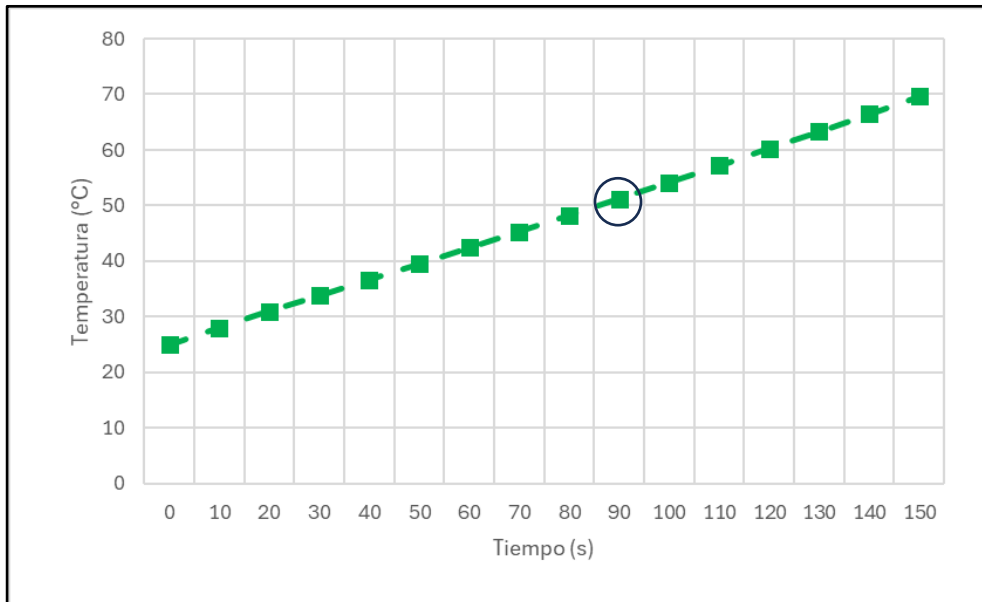


Figura 85:

Gráfica de temperatura promedio en superficie externa de muestra tras 150 s para caso 1



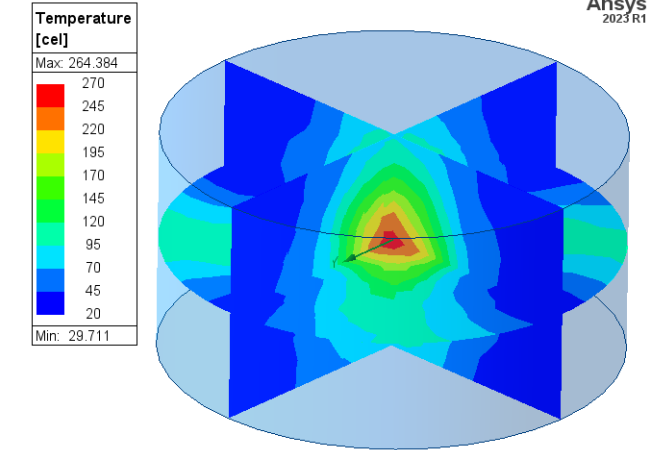
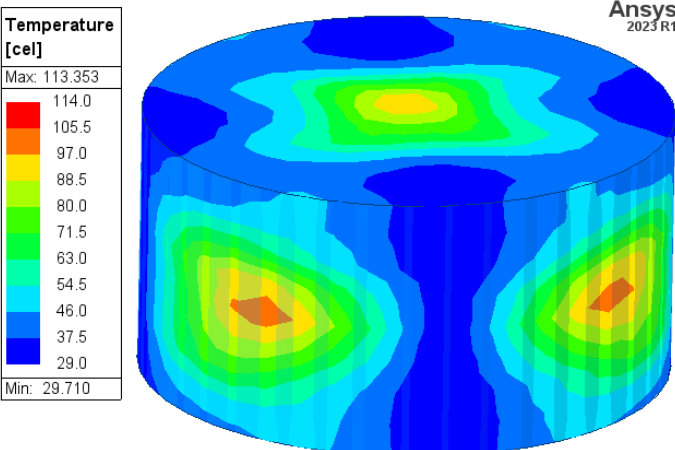
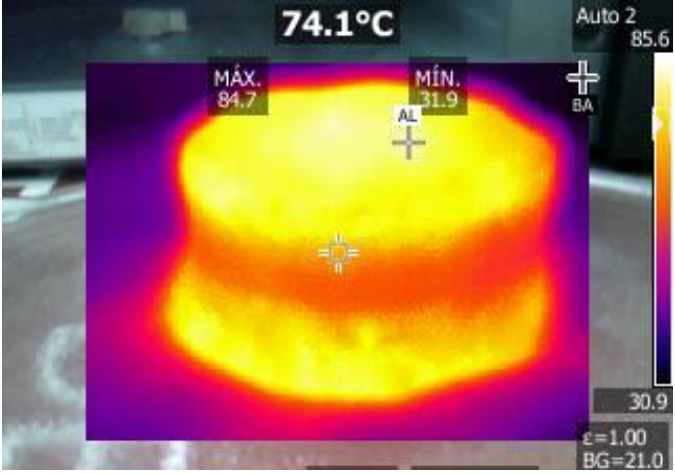
Tanto en las figuras 84 y 85 se evidencia un incremento de temperatura promedio en las curvas referidas al volumen y a la superficie externa de la muestra debido a su interacción con las microondas en la cavidad.

Así también, en la simulación se plotea la distribución de temperatura en los planos XY, XZ y YZ para visualizar el comportamiento térmico al interior del volumen de la muestra de

papa y la temperatura en su superficie externa con la intención de realizar una comparación con medidas experimentales de temperatura obtenidas mediante una cámara termográfica tras calentar durante 90 s. Lo comentado se visualiza en la tabla 10.

Tabla 10:

Distribuciones de temperatura en simulación de caso 1 para volumen y superficie externa, y validación experimental con cámara termográfica

| | |
|--|--|
| <p>Distribución de temperatura en volumen</p> |  <p>Temperature [cel] Max: 264.384 Min: 29.711</p> <p>ANSYS 2023 R1</p> |
| <p>Distribución de temperatura en superficie externa</p> |  <p>Temperature [cel] Max: 113.353 Min: 29.710</p> <p>ANSYS 2023 R1</p> |
| <p>Distribución de temperatura con cámara termográfica</p> |  <p>74.1°C</p> <p>MÁX. 84.7</p> <p>MÍN. 31.9</p> <p>Auto 2 85.6</p> <p>AL</p> <p>BA</p> <p>30.9</p> <p>$\epsilon=1.00$</p> <p>BG=21.0</p> |

De las distribuciones de temperatura, es posible observar que la simulación en su mayoría contiene áreas de color verde que equivalen aproximadamente a una temperatura de entre 80 y 85 °C. En tanto que, las mediciones experimentales de temperatura que brinda la cámara termográfica muestran con su intensidad máxima que los resultados empíricos son valores cercanos o por encima a 80 °C, lo que valida la simulación adecuadamente.

4.2 Caso 2: Simulación del microondas comercial LG modelo MH6536GIS con inclusión de puerto de salida

En este caso se prevé adicionar un puerto de salida tal como se ve en la figura 87 para poder cumplir con el propósito de extraer el vapor de agua que se pueda generar tras deshidratar un producto y así mejorar dicho proceso. Es así como, se ha considerado conveniente que la posición de dicho puerto debe ser en la parte central superior de la cavidad del horno microondas comercial por motivo del movimiento ascendente del vapor. Ahora bien, la desventaja de esta modificación implica tener un medio para la fuga de microondas, lo que representa un riesgo para la integridad física de los usuarios. De ahí que, se plantea determinar el impacto de dicho efecto de fuga, por lo que, se han realizado las siguientes consideraciones adicionales al caso 1:

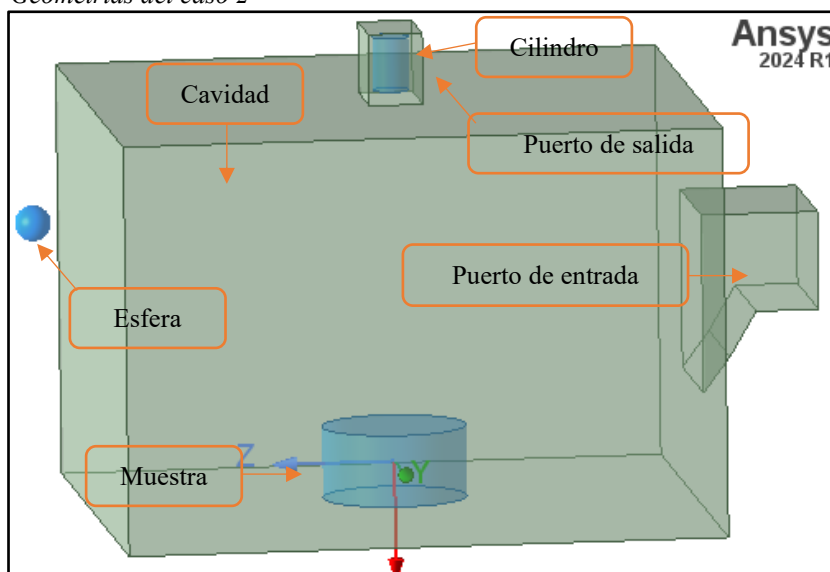
1) Geometría. Para este caso se adiciona el puerto de salida rectangular sobre el cual se implementa un cilindro externo a la cavidad del horno microondas para evaluar si este se calienta debido a la fuga de microondas. Se ha adicionado un puerto de salida con la misma forma que el puerto de entrada dado que, al ser ambos puertos del mismo tipo se minimizan las reflexiones y las pérdidas de energía. Asimismo, la elección simplifica el diseño y permite un análisis más directo de la distribución de los campos dentro de la cavidad.

Por otro lado, tal como se comentó en los resultados de campo eléctrico del caso 1, es imprescindible adicionar una geometría esférica fuera del horno microondas para determinar si es calentada por la aparente fuga de microondas denotada en los vectores de campo eléctrico que parecen salir de la cavidad. Caso contrario, se desea demostrar que los vectores de campo eléctrico no se escapan y simplemente es un detalle por mejorar en la visualización de los vectores. En la figura 86 se puede observar una representación del modelo.

- El puerto de salida tiene una forma rectangular que cumple con tener mayor longitud que la mínima requerida de 30.5 mm para garantizar la propagación a través de este tal como se ha comentado en el caso 1.
- El cilindro acoplado al puerto de salida y ubicado en el exterior de la cavidad es de menor dimensión que la muestra de papa dado que solo sirve para evaluar que tanto se calienta como consecuencia de una fuga de microondas que representa un riesgo para los seres humanos. Se ha optado por un cilindro puesto que, de acuerdo con la literatura científica, esta forma permite en gran medida observar el calentamiento provocado por microondas.
- La esfera colocada fuera del horno microondas modificado tiene como finalidad determinar si realmente el modelo simulado es adecuado en tanto que esta muestra no aumente su temperatura. En la tabla 11 se puede apreciar un resumen de las dimensiones dadas.

Tabla 11:*Dimensiones de las geometrías del caso 2*

| Geometría | Largo [mm] | Ancho [mm] | Altura [mm] | Radio [mm] |
|--------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Cavidad de microondas | 335 | 320 | 230 | – |
| Guía de ondas de entrada | 100 | 35 | 55 | – |
| Muestra de papa | – | – | 40 | 40 |
| Guía de ondas de salida | 50 | 30 | 40 | – |
| Cilindro | – | – | 30 | 10 |
| Esfera | – | – | – | 10 |

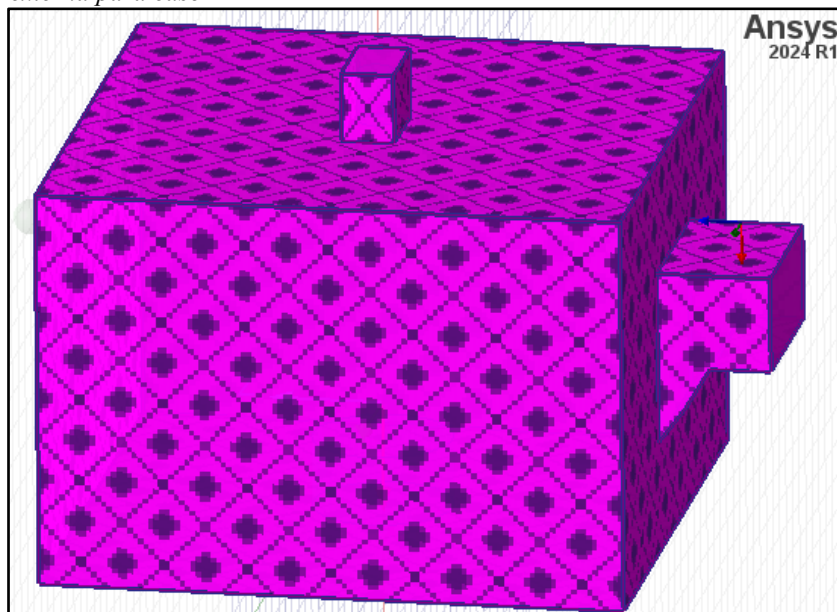
Figura86:
Geometrías del caso 2

2) Material y condiciones de frontera. Aquí también se establecen algunas consideraciones con la finalidad de realizar una correcta simulación:

- Al igual que el caso 1, tampoco se selecciona la cara de salida en la asignación de condición de frontera finite conductivity dado que es un puerto.
- El material para el cilindro y la esfera también será agua debido a previas explicaciones sobre que es el recurso más afectado por las microondas. La figura 87 muestra una representación de la condición de frontera aplicada.

Figura 87:

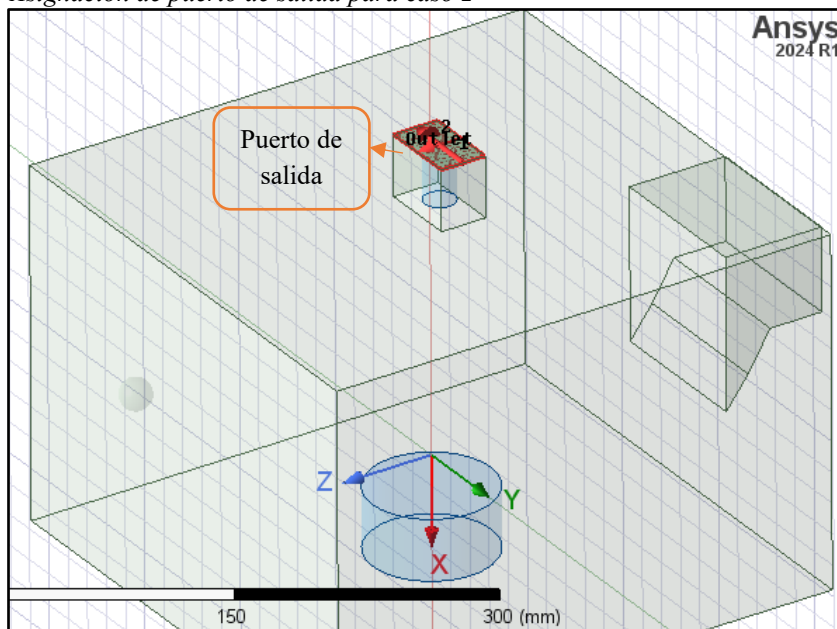
Asignación de condición de frontera de material metálico a superficie externa para caso 2



3) Entradas y potencia. Se conserva la potencia configurada de entrada de 1000 W por medio del puerto de entrada. Asimismo, se adiciona el puerto de salida con la configuración de dos modos necesarios para una adecuada simulación, tal como se observa en la figura 88.

Figura 88:

Asignación de puerto de salida para caso 2



4) Configuración del solucionador y frecuencia de operación. Se mantiene la configuración del anterior caso.

5) Mallado y número de elementos. En la figura 89 se puede visualizar la representación del mallado generada para la cavidad y sus elementos donde se aprecia el

refinamiento de las mallas en la muestra y en el cilindro. En la figura 90, es posible ver como el software adaptativo tras ejecutar 7 iteraciones se llega a cumplir con los parámetros de convergencia. De manera que, en la última iteración se consigue que el mejor mallado para obtener una alta precisión en la distribución de campo eléctrico se alcanza con 287,523 elementos repartidos en 52, 3, 3 y 42% para la cavidad, cilindro, esfera y muestra de papa respectivamente.

Figura 89:
Mallado para cavidad y elementos en caso 2

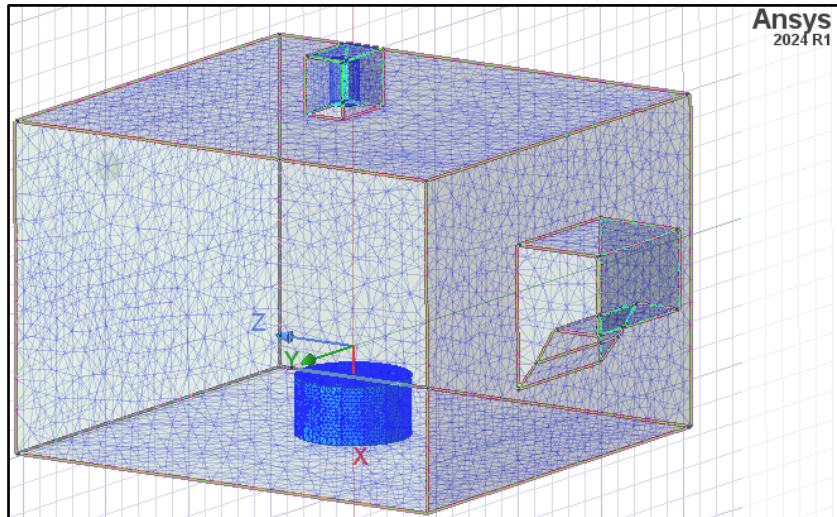
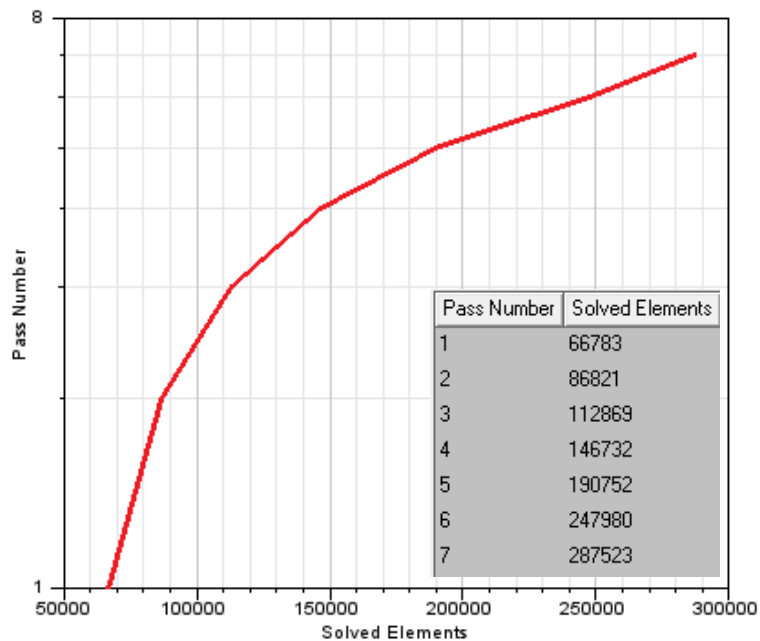


Figura 90:
Número de elementos en mallado para caso 2 tras iteraciones

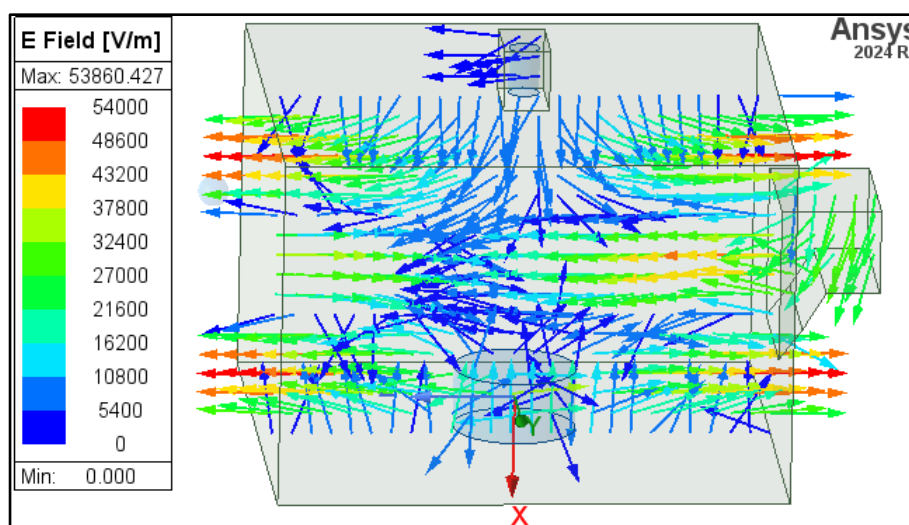


| Total number of elements: 287523 | | | |
|----------------------------------|-------------|-----------------|------------------|
| | / Num Te... | Min edge length | Max edge leng... |
| Cilindro | 8409 | 1.21717 | 4.96126 |
| Muestra2 | 9247 | 1.27445 | 2.61171 |
| Muestra | 120536 | 1.17906 | 7.7263 |
| Horno_Cavidad | 149331 | 1.99013 | 31.2908 |

7) Resultados. Tras ejecutar el análisis, se obtiene la distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ:

Figura 91:

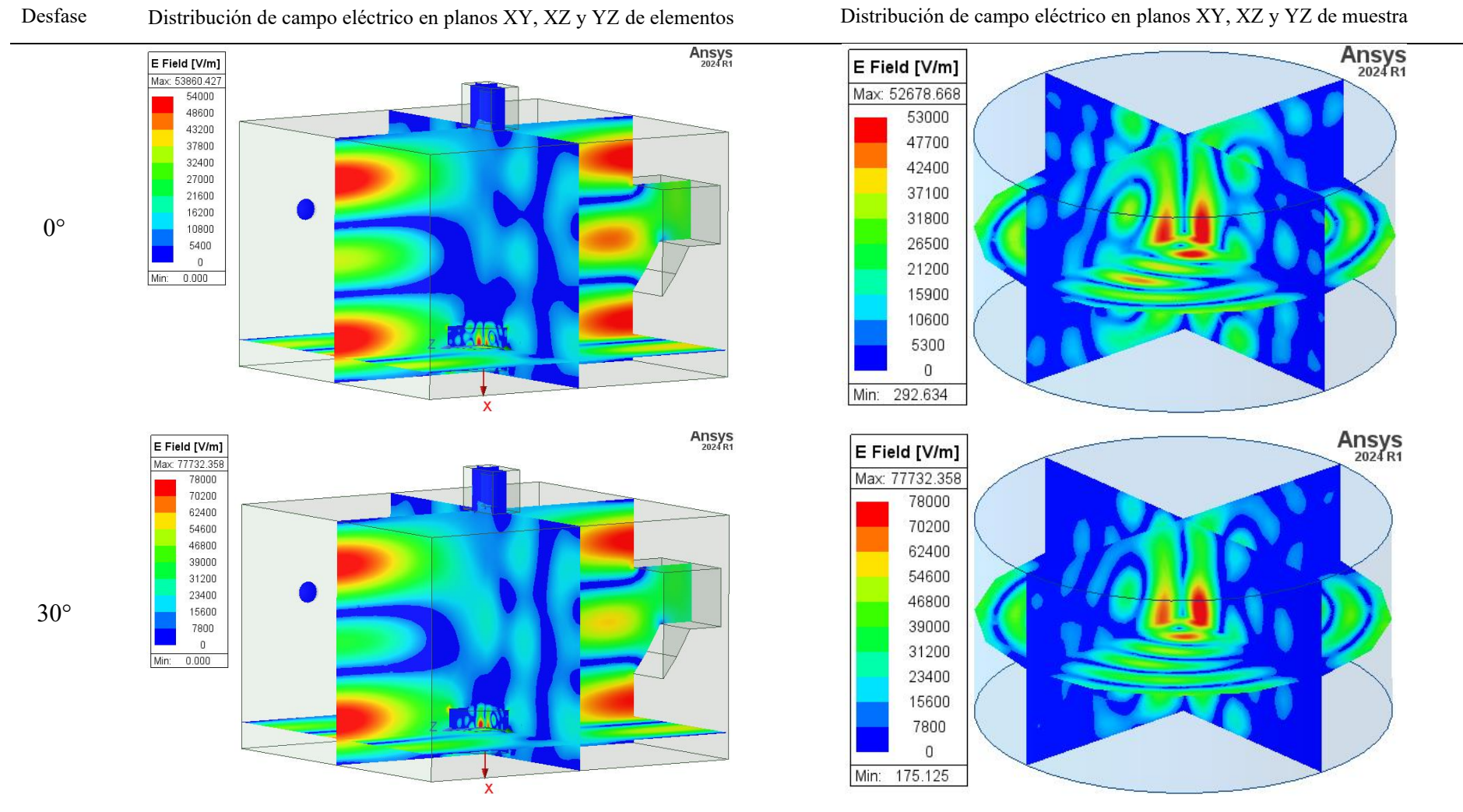
Distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ de elementos para caso 2 en HFSS - ANSYS Electronics



En la figura 91 se puede visualizar el ingreso de las microondas por el puerto de entrada y su propagación en la cavidad del horno microondas comercial hasta incluso en el puerto de salida, aunque aparentemente en menor medida. Cabe señalar que, tal como en el caso 1, también se observa que las microondas manifestadas en forma de vectores relativamente grandes aparentan escaparse de la cavidad. De ahí que, se planifica realizar el análisis térmico para determinar si realmente la esfera es afectada por la fuga de microondas a través de las paredes.

Por otro lado, se obtienen las siguientes distribuciones de campo eléctrico en los planos XY, XZ y YZ, para diferentes desfases en el campo eléctrico de las microondas mostradas en la tabla 12.

Tabla 12:
Distribuciones de campo eléctrico para caso 2 en HFSS – ANSYS Electronics

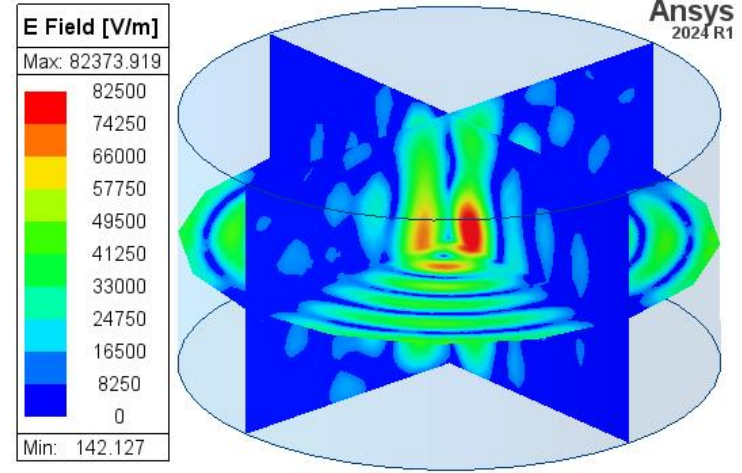
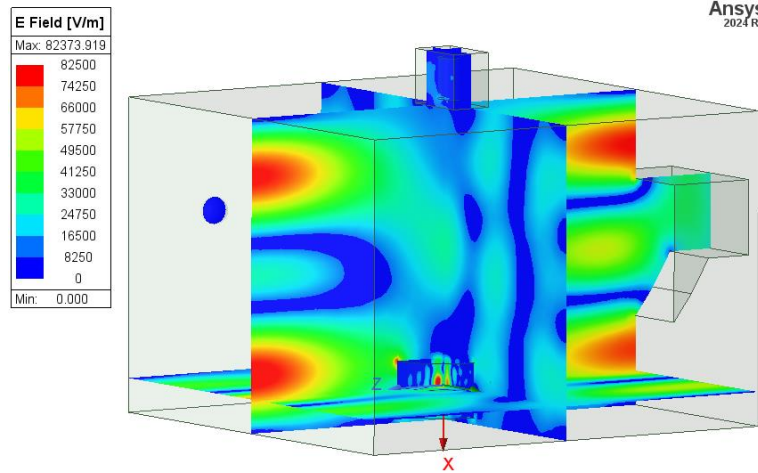


Desfase

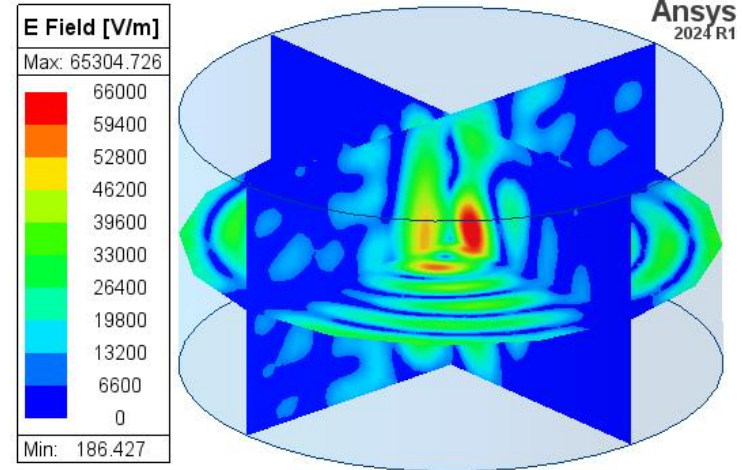
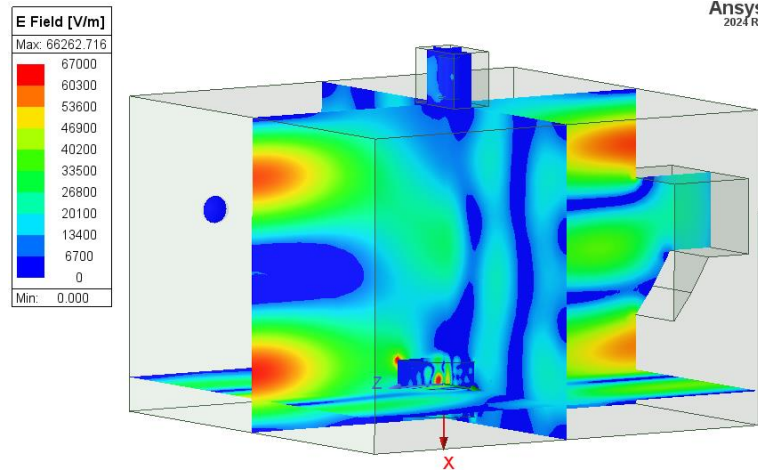
Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra

60°



90°

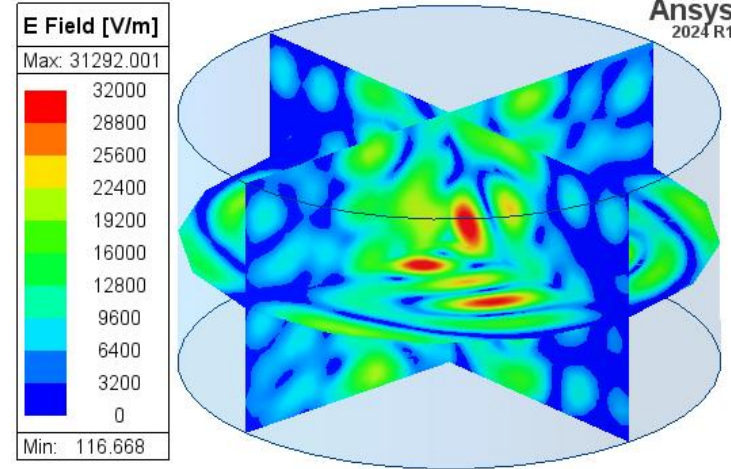
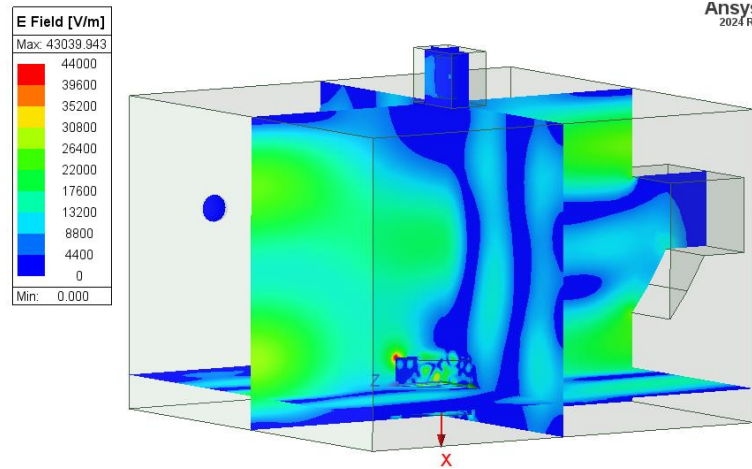


Desfase

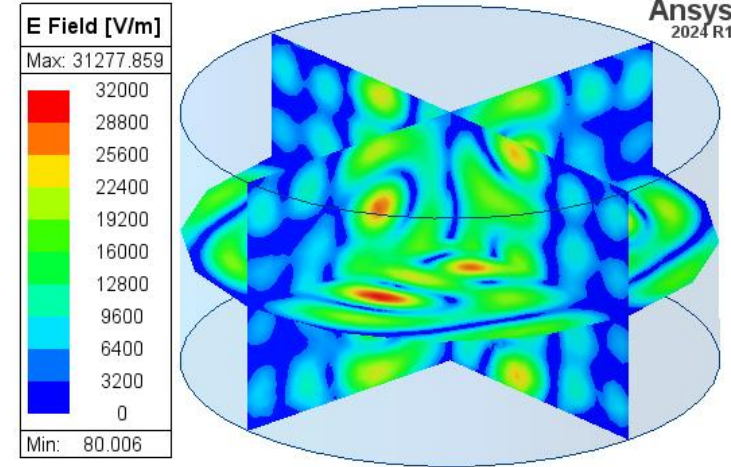
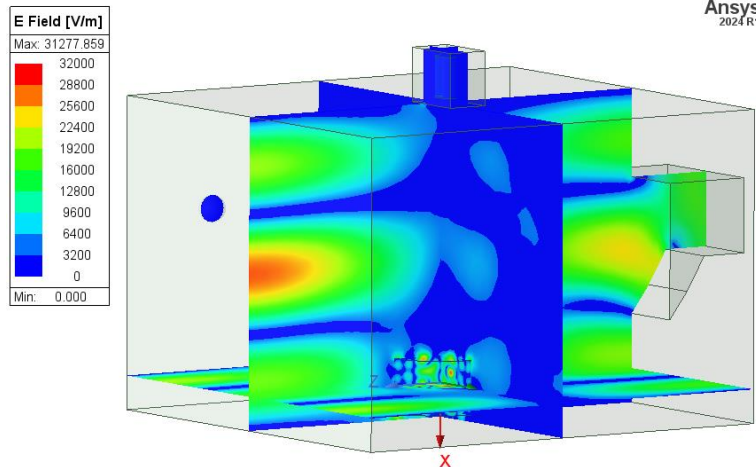
Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra

120°



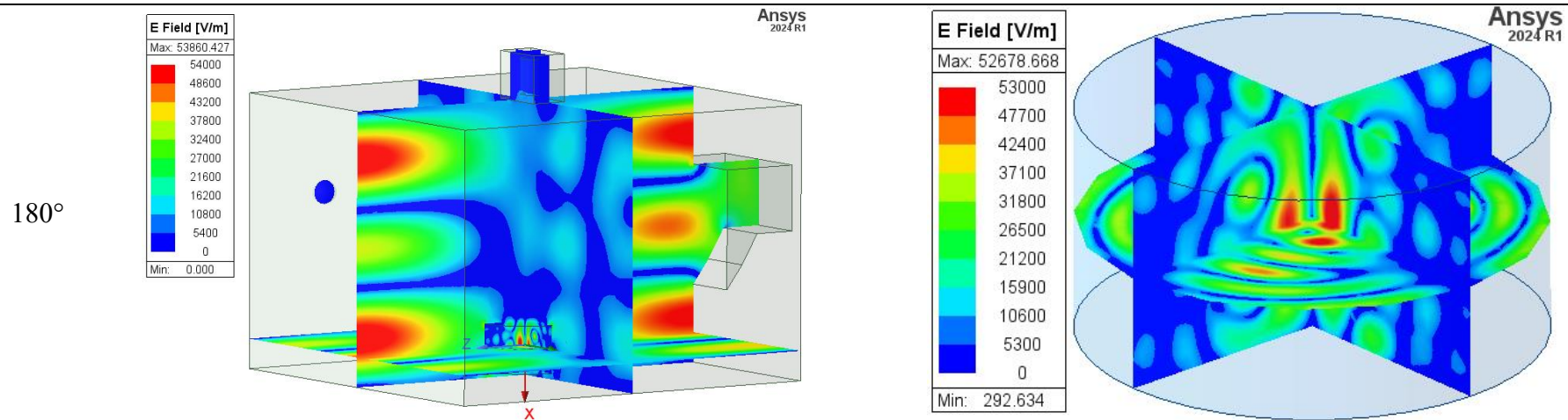
150°



Desfase

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra



De las figuras de la tabla 12, se observan resultados similares a los obtenidos en el caso 1 en cuanto a que los mayores y menores intervalos de campo eléctrico se consiguen con 60° y 150° respectivamente y que la mayor concentración en todos los desfases ocurre en el centro de la muestra. Por otro lado, es posible apreciar que para los desfases de 30° , 60° y 90° ocurre mayor fuga de microondas a través del puerto de salida implementado, lo que provocaría el calentamiento del cilindro acoplado en el exterior de la cavidad de microondas.

Ahora bien, se procede a obtener los resultados de temperatura promedio en los elementos, tanto en su volumen como en su superficie externa para un total de 150 segundos a 1000 W y 2.45 GHz.

Figura 92:

Resultados de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 2

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.3305 | 42.973 | 29.8806 |
| 20s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.7285 | 60.4393 | 34.8189 |
| 30s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.1705 | 77.4278 | 39.782 |
| 40s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.6619 | 93.9649 | 44.7667 |
| 50s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.2055 | 110.075 | 49.7702 |
| 60s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.8039 | 125.782 | 54.7899 |
| 70s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.4594 | 141.107 | 59.8236 |
| 80s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.1742 | 156.068 | 64.8692 |
| 90s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.9502 | 170.686 | 69.9246 |
| 100s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 30.7892 | 184.976 | 74.9882 |
| 110s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.6926 | 198.956 | 80.0582 |
| 120s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 32.6616 | 212.639 | 85.133 |
| 130s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 33.6973 | 226.041 | 90.2113 |
| 140s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 34.8004 | 239.173 | 95.2916 |
| 150s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 35.9716 | 252.048 | 100.373 |

Figura 93:

Resultados de temperatura promedio en volumen de cilindro para caso 2

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6165 | 25.188 | 25.0331 |
| 20s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5652 | 25.4421 | 25.1973 |
| 30s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4979 | 25.6944 | 25.3651 |
| 40s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.451 | 25.9454 | 25.5364 |
| 50s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4232 | 26.1953 | 25.7114 |
| 60s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4135 | 26.4445 | 25.8903 |
| 70s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4208 | 26.6933 | 26.073 |
| 80s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4445 | 26.9419 | 26.2596 |
| 90s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4838 | 27.1923 | 26.4504 |
| 100s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.538 | 27.4445 | 26.6453 |
| 110s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6069 | 27.6976 | 26.8445 |
| 120s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6898 | 27.9519 | 27.0482 |
| 130s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7864 | 28.2077 | 27.2564 |
| 140s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8964 | 28.4652 | 27.4693 |
| 150s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.0196 | 28.7353 | 27.687 |

Figura 94:*Resultados de temperatura promedio en volumen de esfera para caso 2*

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7422 | 24.9998 | 24.9471 |
| 20s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6624 | 24.9979 | 24.9062 |
| 30s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6055 | 24.992 | 24.8678 |
| 40s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5596 | 24.981 | 24.8316 |
| 50s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5206 | 24.9651 | 24.7974 |
| 60s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4866 | 24.945 | 24.7651 |
| 70s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4568 | 24.9215 | 24.7346 |
| 80s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4304 | 24.8958 | 24.7062 |
| 90s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4073 | 24.8687 | 24.6798 |
| 100s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3872 | 24.8408 | 24.6555 |
| 110s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3702 | 24.8128 | 24.6334 |
| 120s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3561 | 24.7958 | 24.6137 |
| 130s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3451 | 24.7936 | 24.5965 |
| 140s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3372 | 24.7951 | 24.5819 |
| 150s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3317 | 24.8005 | 24.5699 |

Figura 95:*Resultados de temperatura promedio en superficie externa de muestra para caso 2*

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.3305 | 31.8011 | 27.3781 |
| 20s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.7285 | 38.5704 | 29.9397 |
| 30s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.1705 | 45.2926 | 32.599 |
| 40s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.6619 | 52.2221 | 35.3479 |
| 50s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.2055 | 59.7169 | 38.1795 |
| 60s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.8039 | 67.3718 | 41.0875 |
| 70s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.4594 | 75.1503 | 44.0663 |
| 80s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.1742 | 83.0201 | 47.1107 |
| 90s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.9502 | 90.9528 | 50.2157 |
| 100s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 30.7892 | 98.9233 | 53.3768 |
| 110s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.6926 | 106.91 | 56.5897 |
| 120s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 32.6616 | 114.893 | 59.8506 |
| 130s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 33.6973 | 122.856 | 63.1556 |
| 140s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 34.8004 | 130.784 | 66.5013 |
| 150s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 35.9716 | 138.664 | 69.8845 |

Figura 96:*Resultados de temperatura promedio en superficie externa de cilindro para caso 2*

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6165 | 25.188 | 24.9999 |
| 20s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5652 | 25.4421 | 25.1339 |
| 30s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4979 | 25.6944 | 25.2729 |
| 40s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.451 | 25.9454 | 25.417 |
| 50s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4232 | 26.1953 | 25.5663 |
| 60s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4135 | 26.4445 | 25.7206 |
| 70s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4208 | 26.6933 | 25.8801 |
| 80s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4445 | 26.9419 | 26.0447 |
| 90s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4838 | 27.1923 | 26.2145 |
| 100s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.538 | 27.4445 | 26.3895 |
| 110s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6069 | 27.6976 | 26.5699 |
| 120s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6898 | 27.9519 | 26.7556 |
| 130s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7864 | 28.2077 | 26.9469 |
| 140s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8964 | 28.4652 | 27.1436 |
| 150s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.0196 | 28.7353 | 27.3461 |

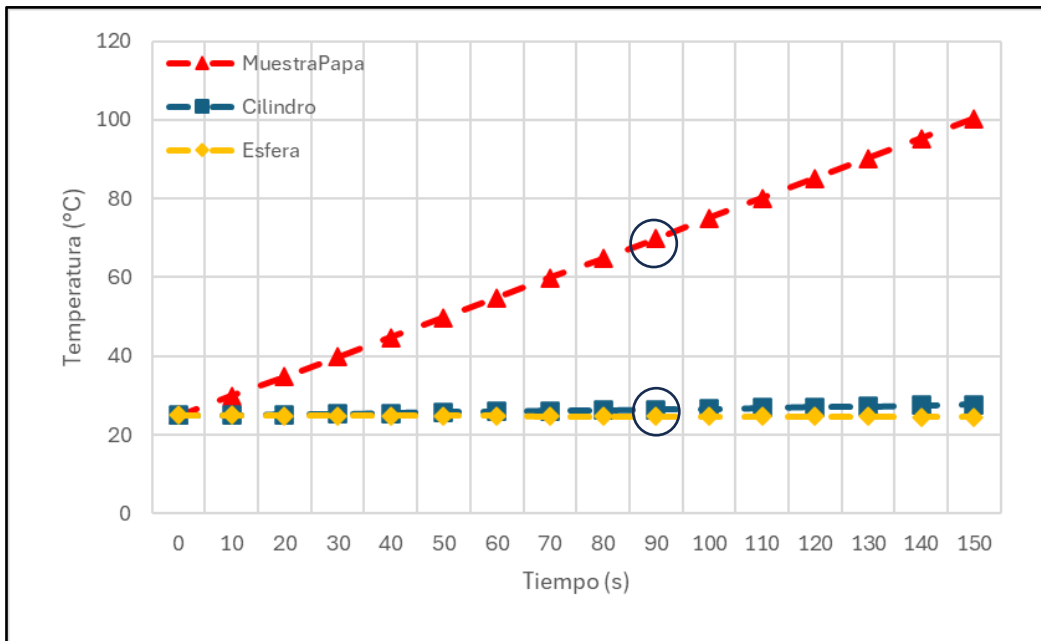
Figura 97:*Resultados de temperatura promedio en superficie externa de esfera para caso 2*

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7422 | 24.9909 | 24.8546 |
| 20s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6624 | 24.9746 | 24.7941 |
| 30s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6055 | 24.9522 | 24.7462 |
| 40s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5596 | 24.9274 | 24.7055 |
| 50s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5206 | 24.9025 | 24.67 |
| 60s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4866 | 24.879 | 24.6386 |
| 70s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4568 | 24.8577 | 24.6108 |
| 80s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4304 | 24.839 | 24.5863 |
| 90s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4073 | 24.8233 | 24.565 |
| 100s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3872 | 24.8107 | 24.5468 |
| 110s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3702 | 24.8015 | 24.5316 |
| 120s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3561 | 24.7958 | 24.5196 |
| 130s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3451 | 24.7936 | 24.5107 |
| 140s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3372 | 24.7951 | 24.505 |
| 150s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3317 | 24.8005 | 24.5027 |

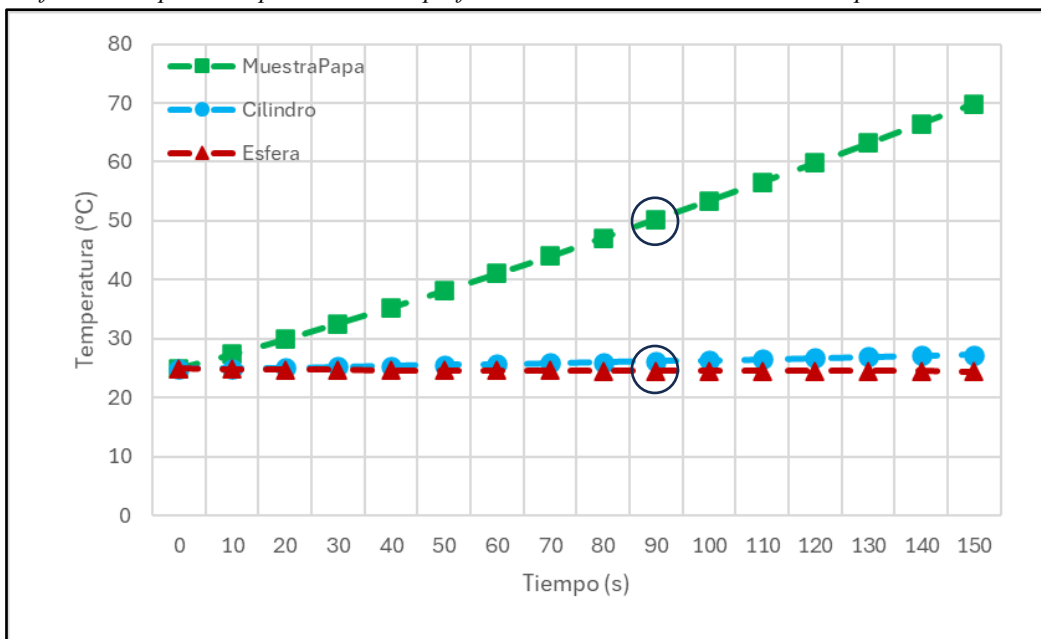
Desde la figura 92 hasta la 97, se han enmarcado las medidas de temperatura promedio en volumen y superficie externa respectivamente a 90 segundos para comparar con los resultados de los demás casos. Por otro lado, dichos valores tabulados se han resumido en las siguientes gráficas que contienen los valores de temperatura promedio en el volumen para la figura 98 y superficie externa para la figura 99 de los elementos cada 10 segundos tras la potencia y frecuencia aplicada de 1000 W y 2.45 GHz.

Figura 98:

Gráfica de temperatura promedio en volumen de elementos tras 150 s para caso 2

**Figura 99:**

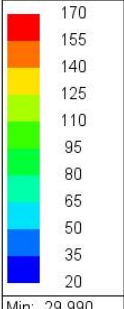
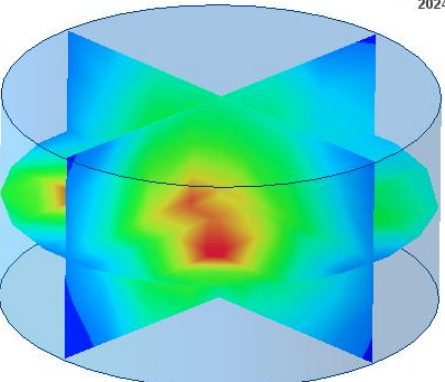
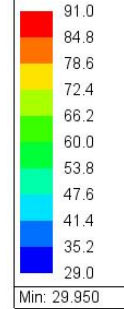
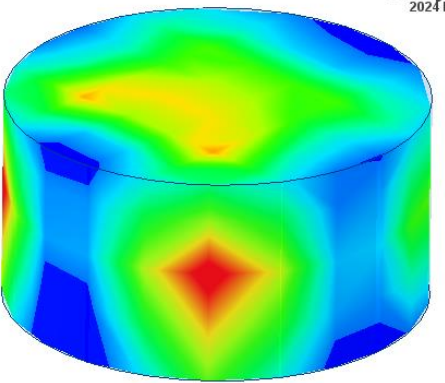
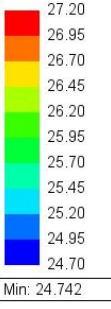
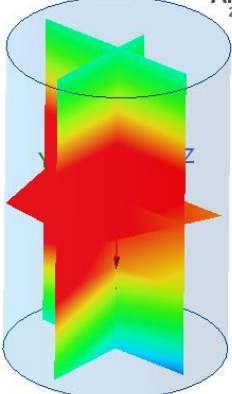
Gráfica de temperatura promedio en superficie externa de elementos tras 150 s para caso 2

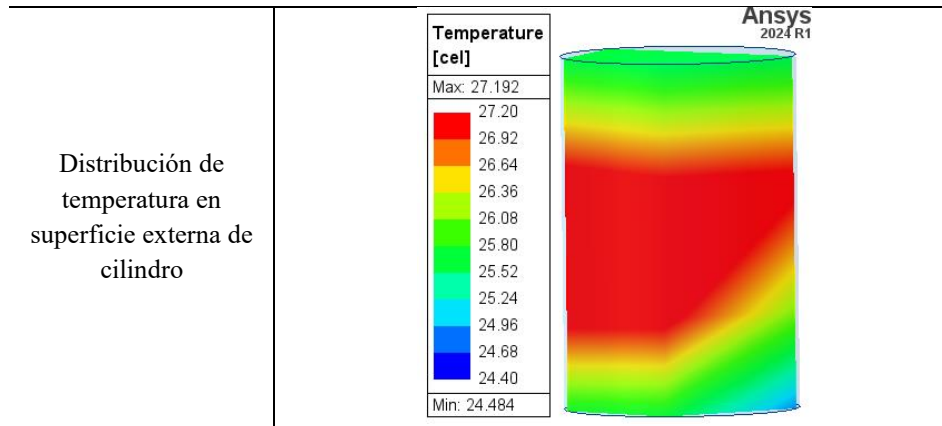


Tanto en las figuras 98 y 99, además del incremento de temperatura promedio evidenciado en las curvas del volumen y superficie externa de la muestra debido a su interacción con las microondas en la cavidad, se aprecia que el cilindro incluido en la simulación se calienta por motivo de la fuga de microondas a través del puerto de salida. En tanto que, la temperatura de la esfera es casi constante, con un mínimo error posiblemente atribuido al proceso computacional, lo que indica que no es afectada por la microondas de la cavidad y con ello se descarta lo mostrado en la figura 91 donde los vectores de campo parecen escapar del horno microondas.

Así también, en la simulación se plotea la distribución de temperatura en los elementos tales como muestra de papa y cilindro tanto de su volumen como de su superficie externa con la intención de visualizar los cambios en su comportamiento térmico como se observa en la tabla 13. Ahora bien, en la esfera no se considera necesario dado que mantiene su temperatura constante.

Tabla 13:
Distribuciones de temperatura para caso 2 en simulación con volumen y superficie externa en elementos tras 90 s

| | |
|---|---|
| <p>Distribución de temperatura en volumen de muestra de papa</p> | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> <p>Temperature [cel]</p> <p>Max: 164.745</p>  <p>Min: 29.990</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Ansys 2024 R1</p>  </div> </div> |
| <p>Distribución de temperatura en superficie externa de muestra de papa</p> | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> <p>Temperature [cel]</p> <p>Max: 90.953</p>  <p>Min: 29.950</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Ansys 2024 R1</p>  </div> </div> |
| <p>Distribución de temperatura en volumen de cilindro</p> | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;"> <p>Temperature [cel]</p> <p>Max: 27.191</p>  <p>Min: 24.742</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Ansys 2024 R1</p>  </div> </div> |



De las distribuciones de temperatura para la muestra es posible comentar que es más uniforme y tiene un valor máximo de temperatura menor a comparación del caso 1. Por otro lado, se denota que el cilindro colocado al exterior de la cavidad y acoplado al puerto de salida se calienta, lo que significa que realmente sí existe fuga de microondas. Es así como, se procede realizar un caso 3 adicionando una rejilla de protección para evitar dicha fuga de microondas.

4.3 Caso 3: Simulación del microondas comercial LG modelo MH6536GIS adicionando protección para evitar fuga de microondas por el puerto de salida

En este modelo de estudio se adicionó a lo trabajado en el caso 2 una protección que implicaría la simulación de una rejilla que actuaría como una barrera a las ondas electromagnéticas, la cual, sería útil para mantener las microondas dentro de la cavidad y evitar su fuga. Así también, que con este adicional se alcance el principal objetivo de la tesis que consiste en extraer el vapor de alimentos a deshidratar sin riesgo de fuga de microondas para salvaguardar la seguridad de los usuarios. De ahí que, se han realizado consideraciones adicionales al caso 2:

1) Geometría. Para este caso se toman las condiciones de diseño del caso 2. En adición, se implementa una rejilla como la vista en la figura 100, la cual se coloca entre la cavidad del horno microondas y el puerto de salida tal como se muestra en la figura 101 para evaluar la estadía de las microondas dentro de la cavidad; así como, la fuga de estas.

➤ La rejilla tiene dimensiones proporcionales al puerto de salida ($50 \times 30 \text{ mm}$) y un grosor de 1.5 mm, aproximándose a la protección utilizada en hornos microondas reales. Los agujeros que la componen tienen un radio de 0.5 mm. En la tabla 14 se puede apreciar un resumen de las dimensiones dadas.

Tabla 14:
Dimensiones de las geometrías de caso 3

| Geometría | Largo [mm] | Ancho [mm] | Altura [mm] | Radio [mm] |
|--------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Cavidad de microondas | 335 | 320 | 230 | – |
| Guía de ondas de entrada | 100 | 35 | 55 | – |
| Muestra de papa | – | – | 40 | 40 |
| Guía de ondas de salida | 50 | 30 | 40 | – |
| Cilindro | – | – | 30 | 10 |
| Esfera | – | – | – | 10 |

| | | | | |
|---------|----|----|-----|-----|
| Rejilla | 50 | 30 | 1.5 | 0.5 |
|---------|----|----|-----|-----|

Figura 100:
Rejilla de protección

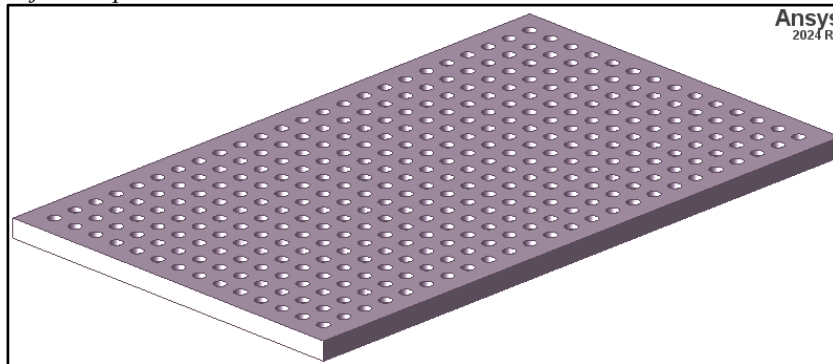
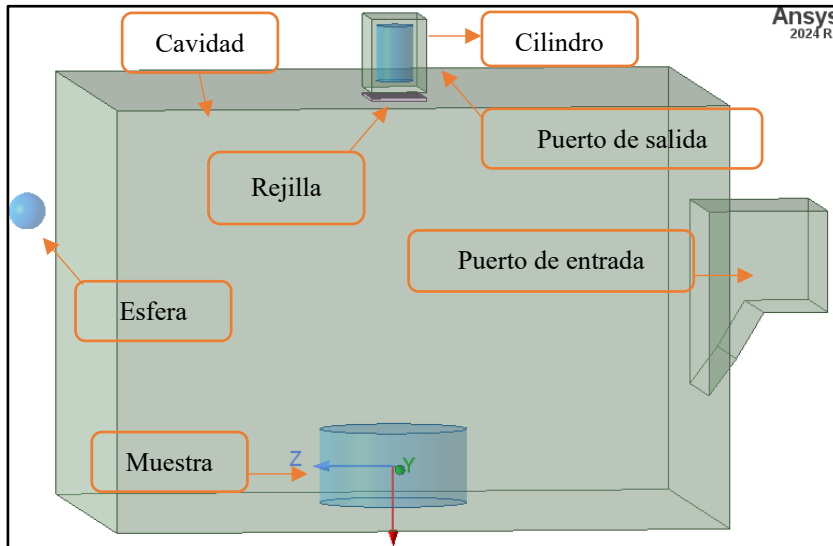


Figura 101:
Geometrías del caso 3

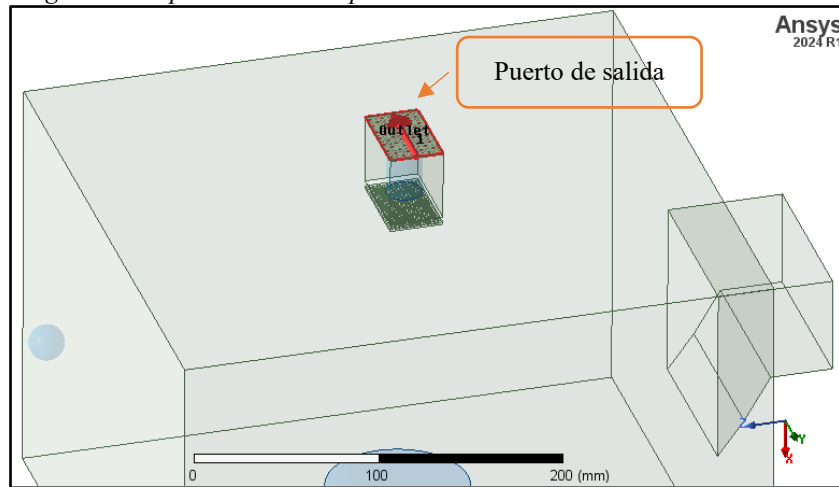


2) Material y condiciones de frontera. Aquí también se establecen algunas consideraciones con la finalidad de realizar una correcta simulación:

- La rejilla trabajará con el acero inoxidable como material designado. Se optó por este material debido a que reflejará satisfactoriamente la parte eléctrica de las microondas. Además, por su buena capacidad no magnética que no permitirá que la parte magnética de las microondas influya sobre el material. De ahí que, dicha rejilla actuará como una barrera óptimamente desarrollada para evitar pérdidas de energía en el sistema y para aislar y proteger componentes.

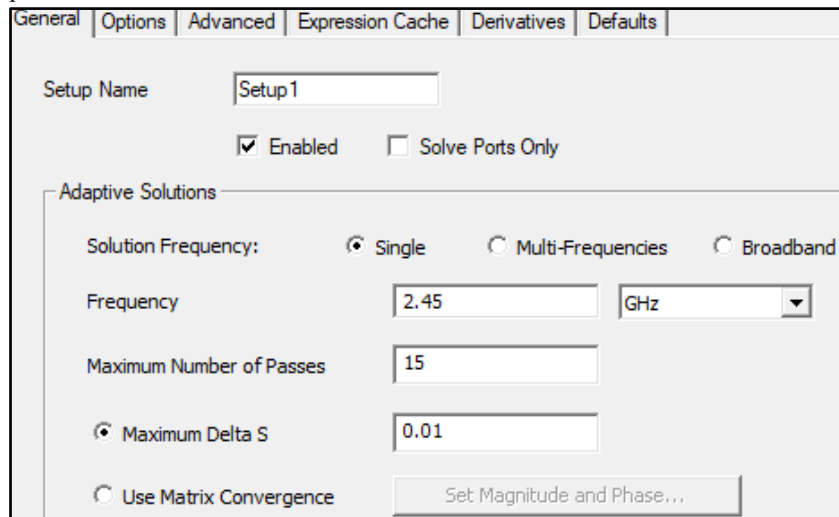
3) Entradas y potencia. Se mantiene la configuración del caso 2. En la figura 102 se visualiza una representación de la asignación del puerto de salida.

Figura 102:
Asignación de puerto de salida para caso 3



4) Configuración del solucionador y frecuencia de operación. Se reduce el delta del parámetro S con la finalidad de aumentar la precisión del modelo tal como se puede ver en la figura 103.

Figura 103:
Configuración de solución adaptativa del software con frecuencia de operación para caso 3



5) Mallado y número de elementos. En la figura 104 se puede visualizar la representación del mallado generada para la cavidad y sus elementos. En la figura 105, se puede apreciar que, el software adaptativo tras realizar 7 iteraciones cumple con los parámetros de convergencia y determina que el mejor mallado para obtener una alta precisión en la distribución de campo eléctrico debe ser con 436,332 elementos repartidos en 61.42, 4.79, 0.17 y 33.62 para la cavidad, cilindro, esfera y muestra de papa respectivamente. En tanto que, el

software le asigna la cantidad fija de 46,655 elementos a la rejilla. De ahí que, el total de elementos finitos a resolver con las ecuaciones es de 482,987.

Figura 104:
Mallado para cavidad y elementos en caso 3

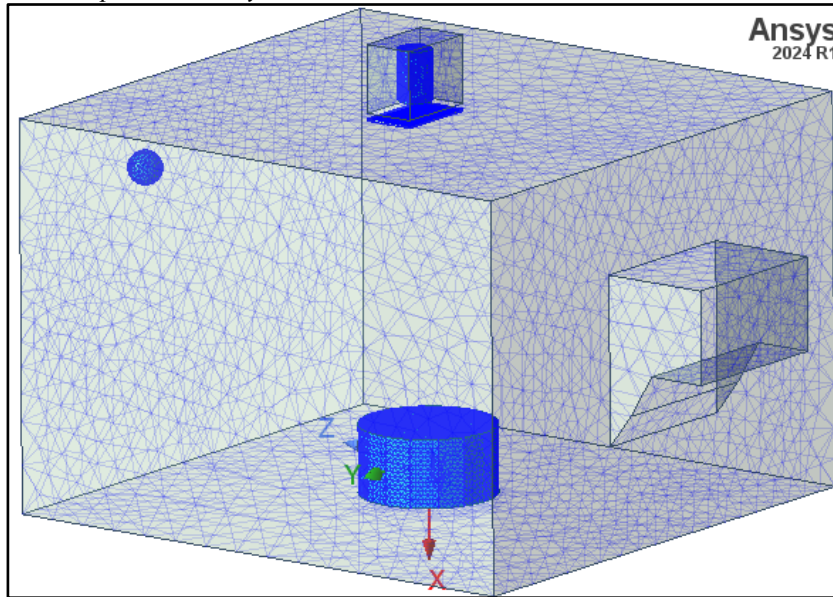
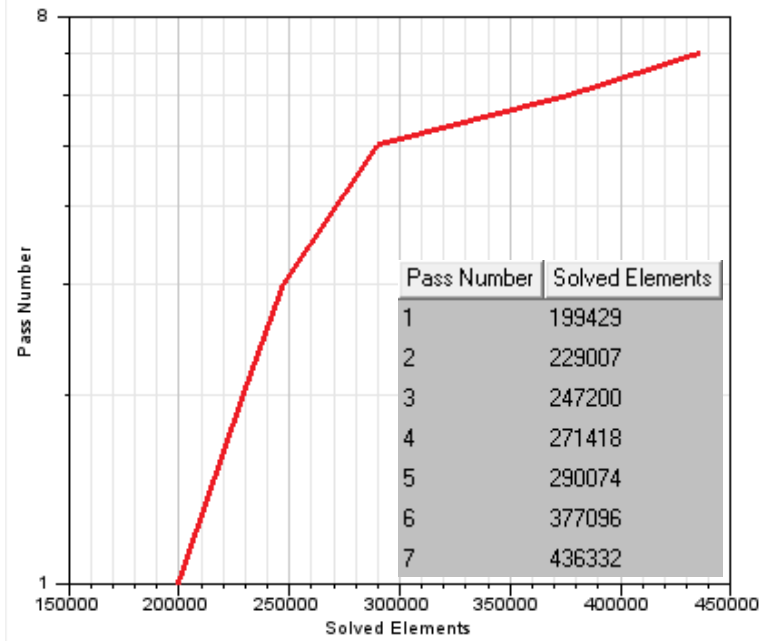


Figura 105:
Número de elementos en mallado para caso 3 tras iteraciones

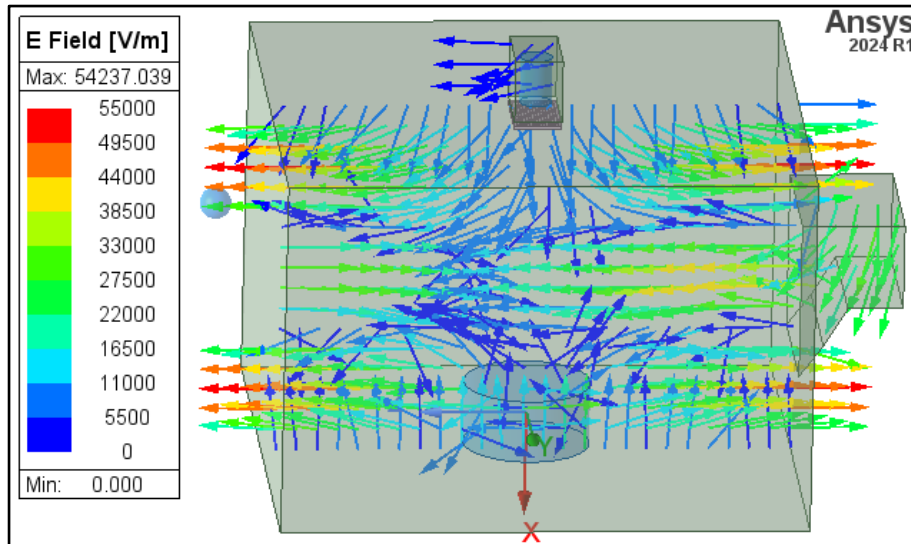


| Total number of elements: 482987 | | | |
|----------------------------------|----------|-----------------|-----------------|
| | Num Tets | Min edge length | Max edge length |
| Muestra2 | 739 | 2.63313 | 8.54911 |
| Cilindro | 20912 | 1.19825 | 2.66976 |
| Prot_sup | 46655 | 0.283982 | 6.45663 |
| Muestra | 146699 | 1.03179 | 5.77087 |
| Horno_Cavidad | 267982 | 0.362005 | 30.4066 |

6) Resultados. Tras ejecutar el análisis, se obtiene la distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ:

Figura 106:

Distribución vectorial de campo eléctrico en el plano XZ de elementos para caso 3 en HFSS - ANSYS Electronics



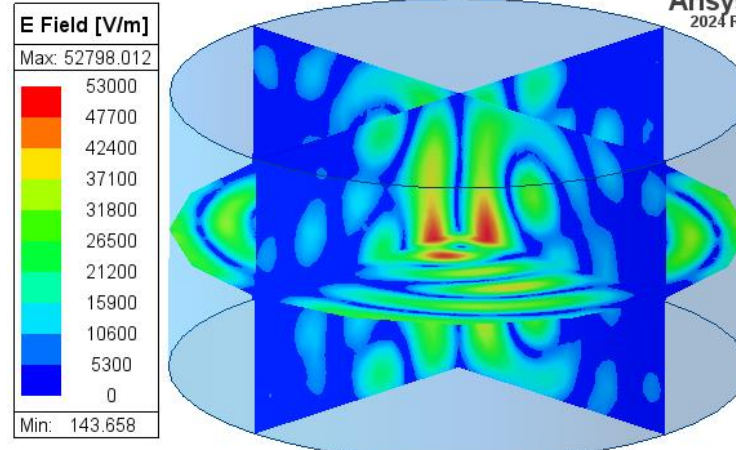
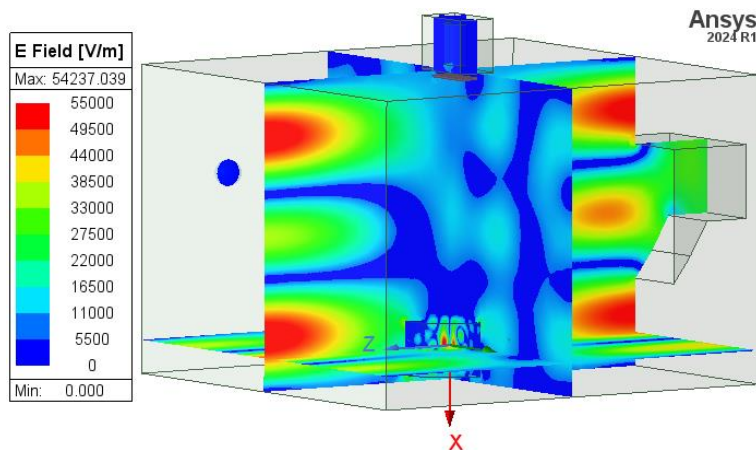
En la figura 106 se observa el ingreso de las microondas a través del puerto de entrada y su propagación dentro de la cavidad del horno microondas comercial, extendiéndose incluso hacia el puerto de salida, aunque aparentemente en menor intensidad. Es importante destacar que, al igual que en los casos 1 y 2, se identifican microondas representadas por vectores relativamente grandes que parecen escapar de la cavidad. Aunque la figura se presenta como una ilustración estática, en realidad es una captura de un momento dinámico del sistema. Por este motivo, se planifica realizar un análisis térmico para confirmar si efectivamente existen fugas de microondas a través de las paredes o la placa implementada, verificando así el cumplimiento de su propósito.

Por otro lado, se obtienen las siguientes distribuciones de campo eléctrico en los planos XY, XZ y YZ, para diferentes desfases en el campo eléctrico de las microondas, tal y como se observa en la tabla 15.

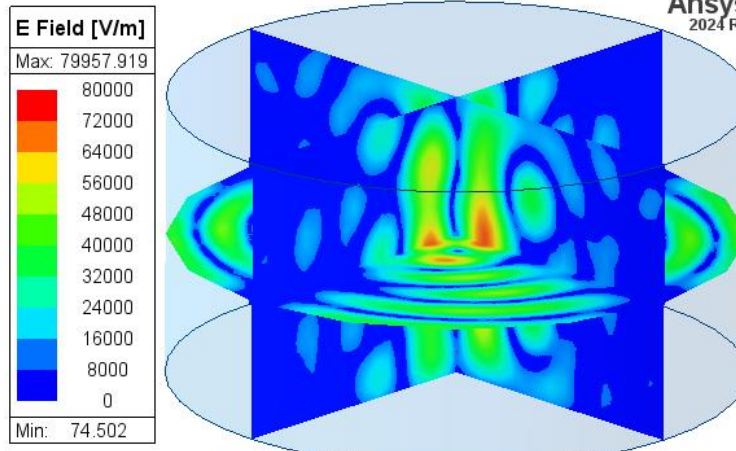
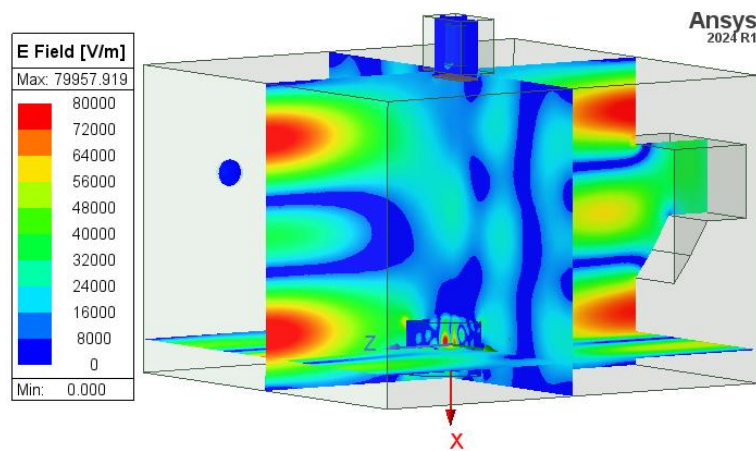
Tabla 15:
Distribuciones de campo eléctrico para caso 3 en HFSS – ANSYS Electronics

Desfase Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra

0°



30°

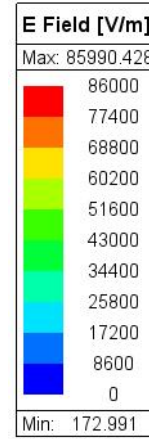
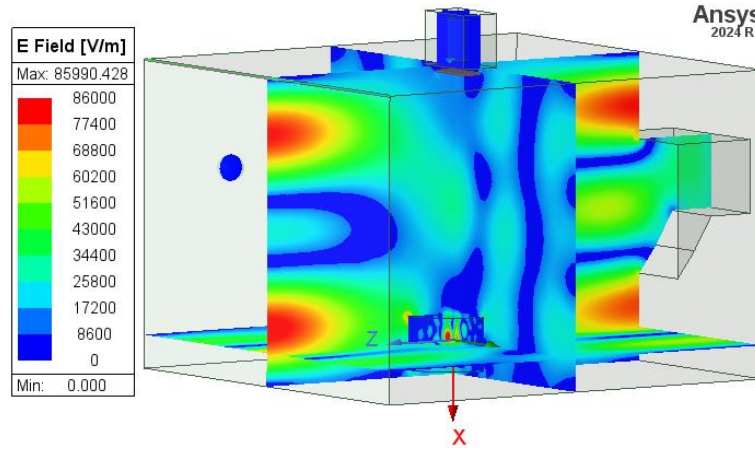


Desfase

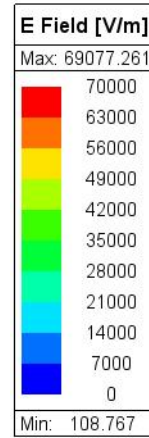
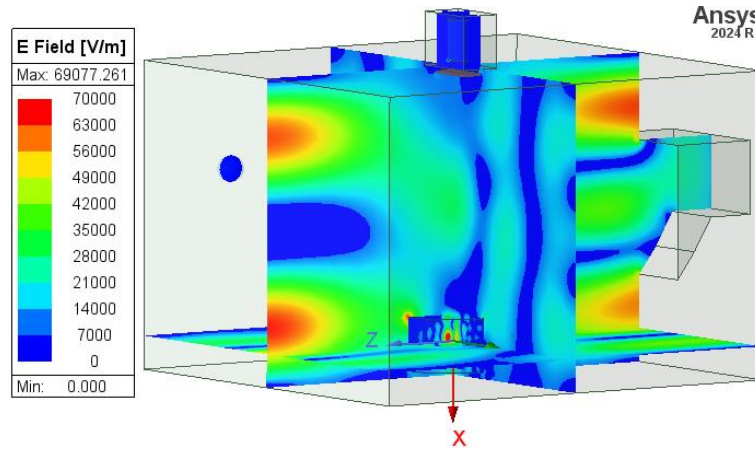
Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra para caso 3 en HFSS - ANSYS Electronics

60°



90°

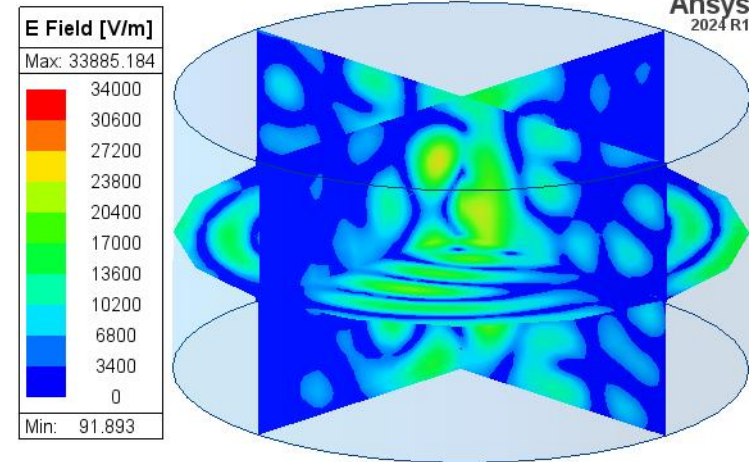
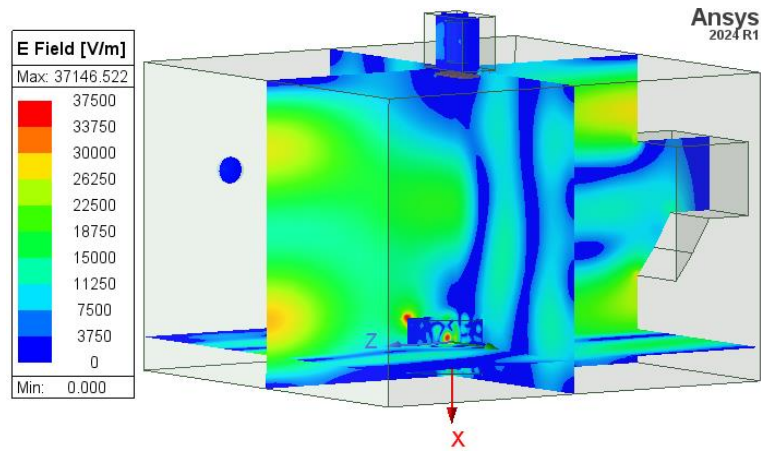


Desfase

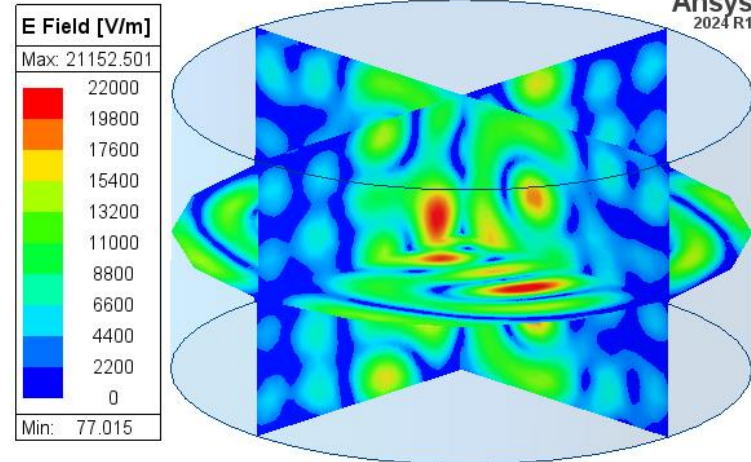
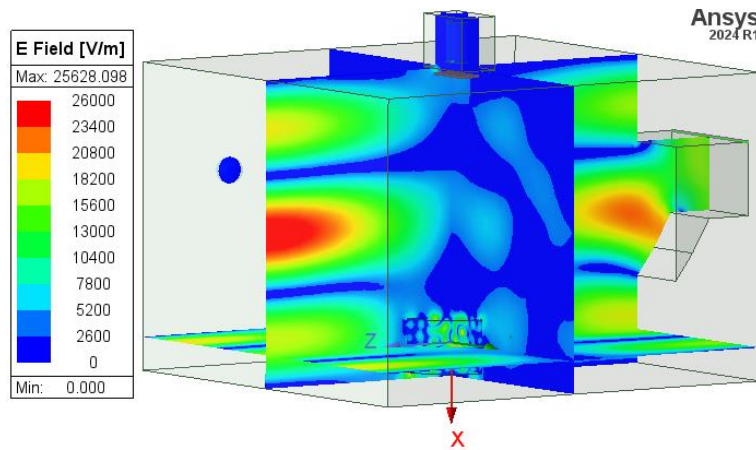
Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra

120°



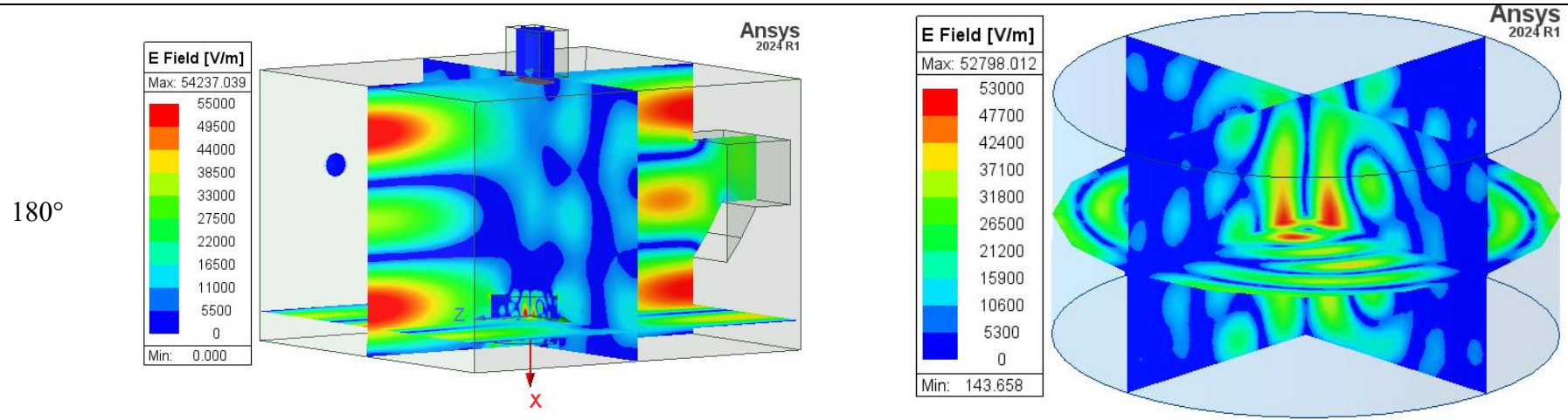
150°



Desfase

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de elementos

Distribución de campo eléctrico en planos XY, XZ y YZ de muestra



De las figuras de la tabla 15, se observan resultados similares a los obtenidos en el caso 2 en cuanto a que los mayores y menores intervalos de campo eléctrico se consiguen con 60° y 150° respectivamente y que la mayor concentración en todos los desfases ocurre en el centro de la muestra. Por otro lado, se evidencia que existe una mínima fuga de microondas en el desfase de 120 que se evaluará térmicamente su influencia el objeto colocado tras ella.

Ahora bien, se procede a obtener los resultados de temperatura promedio en los elementos, tanto en su volumen como en su superficie externa para un total de 150 segundos a 1000 W y 2.45 GHz.

Figura 107:

Resultados de temperatura promedio en volumen de muestra tras 150 s para caso 3

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.2076 | 42.4805 | 29.6016 |
| 20s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.5611 | 59.4577 | 34.2686 |
| 30s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.9723 | 75.9621 | 38.9681 |
| 40s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.4026 | 92.0215 | 43.6963 |
| 50s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.8866 | 107.662 | 48.4501 |
| 60s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.4263 | 122.907 | 53.2263 |
| 70s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.024 | 137.779 | 58.0223 |
| 80s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.6814 | 152.298 | 62.8356 |
| 90s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.4004 | 166.483 | 67.6639 |
| 100s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 30.1823 | 180.351 | 72.505 |
| 110s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.0285 | 193.919 | 77.3571 |
| 120s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.9399 | 207.201 | 82.2182 |
| 130s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 32.9176 | 220.212 | 87.0867 |
| 140s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 33.962 | 232.964 | 91.9609 |
| 150s | Object | Volume | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 35.0738 | 245.47 | 96.8394 |

Figura 108:

Resultados de temperatura promedio en volumen de cilindro para caso 3 tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz.

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7439 | 25.0929 | 24.9785 |
| 20s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7347 | 25.1625 | 25.0045 |
| 30s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7289 | 25.2229 | 25.0337 |
| 40s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7229 | 25.282 | 25.0656 |
| 50s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.728 | 25.3427 | 25.0997 |
| 60s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7418 | 25.4011 | 25.1359 |
| 70s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7628 | 25.4576 | 25.174 |
| 80s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7898 | 25.5127 | 25.214 |
| 90s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8223 | 25.5668 | 25.2558 |
| 100s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8595 | 25.6201 | 25.2995 |
| 110s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8977 | 25.673 | 25.3451 |
| 120s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.9347 | 25.7257 | 25.3927 |
| 130s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.9746 | 25.7783 | 25.4423 |
| 140s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.0176 | 25.8313 | 25.4939 |
| 150s | Object | Volume | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.0635 | 25.8845 | 25.5477 |

Figura 109:

Resultados de temperatura promedio en volumen de esfera para caso 3 tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz.

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7524 | 24.9997 | 24.9472 |
| 20s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6717 | 24.9974 | 24.9064 |
| 30s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6145 | 24.9908 | 24.8682 |
| 40s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5685 | 24.9789 | 24.8321 |
| 50s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5295 | 24.9622 | 24.798 |
| 60s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4955 | 24.9413 | 24.7657 |
| 70s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4655 | 24.9173 | 24.7353 |
| 80s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4386 | 24.8912 | 24.7069 |
| 90s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4136 | 24.8637 | 24.6804 |
| 100s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3914 | 24.8355 | 24.6561 |
| 110s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3719 | 24.8073 | 24.6339 |
| 120s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3552 | 24.7831 | 24.6141 |
| 130s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3412 | 24.7804 | 24.5967 |
| 140s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.33 | 24.7813 | 24.5818 |
| 150s | Object | Volume | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3217 | 24.786 | 24.5696 |

Figura 110:

Resultados de temperatura promedio en superficie externa de muestra de papa tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz.

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|---------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.2076 | 32.1974 | 27.1793 |
| 20s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.5611 | 39.3314 | 29.5522 |
| 30s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.9723 | 46.3892 | 32.0333 |
| 40s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.4026 | 53.3695 | 34.614 |
| 50s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 26.8866 | 60.2725 | 37.2866 |
| 60s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 27.4263 | 67.099 | 40.044 |
| 70s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.024 | 73.8496 | 42.8801 |
| 80s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 28.6814 | 80.5254 | 45.7887 |
| 90s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 29.4004 | 88.0562 | 48.7645 |
| 100s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 30.1823 | 96.0599 | 51.8024 |
| 110s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.0285 | 104.112 | 54.8976 |
| 120s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 31.9399 | 112.188 | 58.0457 |
| 130s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 32.9176 | 120.265 | 61.2426 |
| 140s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 33.962 | 128.323 | 64.4843 |
| 150s | Object | Surface | Muestra | Temperature[C] | Default | | Reduced | 35.0738 | 136.346 | 67.7673 |

Figura 111:

Resultados de temperatura promedio en superficie externa de cilindro tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz.

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7439 | 25.061 | 24.9273 |
| 20s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7347 | 25.1143 | 24.9379 |
| 30s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7289 | 25.1694 | 24.9558 |
| 40s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7229 | 25.2229 | 24.9791 |
| 50s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.728 | 25.2746 | 25.0066 |
| 60s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7418 | 25.3246 | 25.0378 |
| 70s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7628 | 25.3732 | 25.0724 |
| 80s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7898 | 25.4209 | 25.1101 |
| 90s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8223 | 25.4683 | 25.1506 |
| 100s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8595 | 25.5157 | 25.194 |
| 110s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.8977 | 25.5748 | 25.2402 |
| 120s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.9347 | 25.6428 | 25.2891 |
| 130s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.9746 | 25.7129 | 25.3408 |
| 140s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.0176 | 25.7849 | 25.3953 |
| 150s | Object | Surface | Cilindro | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25.0635 | 25.8592 | 25.4526 |

Figura 112:

Resultados de temperatura promedio en superficie externa de esfera tras 90 s a 1000 W y 2.45 GHz.

| Time | Entity Type | Geometry Type | Entity | Quantity | Side | Normal | Mesh | Min | Max | Mean |
|------|-------------|---------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 25 | 25 | 25 |
| 10s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.7524 | 24.9883 | 24.8552 |
| 20s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6717 | 24.9693 | 24.795 |
| 30s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.6145 | 24.945 | 24.7474 |
| 40s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5685 | 24.919 | 24.7068 |
| 50s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.5295 | 24.8937 | 24.6714 |
| 60s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4955 | 24.8696 | 24.64 |
| 70s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4655 | 24.8473 | 24.6122 |
| 80s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4386 | 24.8282 | 24.5877 |
| 90s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.4136 | 24.812 | 24.5663 |
| 100s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3914 | 24.799 | 24.5479 |
| 110s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3719 | 24.7893 | 24.5325 |
| 120s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3552 | 24.7831 | 24.5202 |
| 130s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3412 | 24.7804 | 24.511 |
| 140s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.33 | 24.7813 | 24.505 |
| 150s | Object | Surface | Muestra2 | Temperature[C] | Default | | Reduced | 24.3217 | 24.786 | 24.5023 |

Desde la figura 107 hasta la 112, se han enmarcado las medidas de temperatura promedio en volumen y superficie externa respectivamente a 90 segundos para comparar con los resultados de los demás casos.

De forma que, se obtienen las siguientes gráficas que contienen los valores de temperatura promedio en el volumen para la figura 113 y superficie externa para la figura 114 de los elementos cada 10 segundos para la potencia y frecuencia aplicada.

Figura 113:

Gráfica de temperatura promedio en volumen de elementos tras 150 s para caso 3

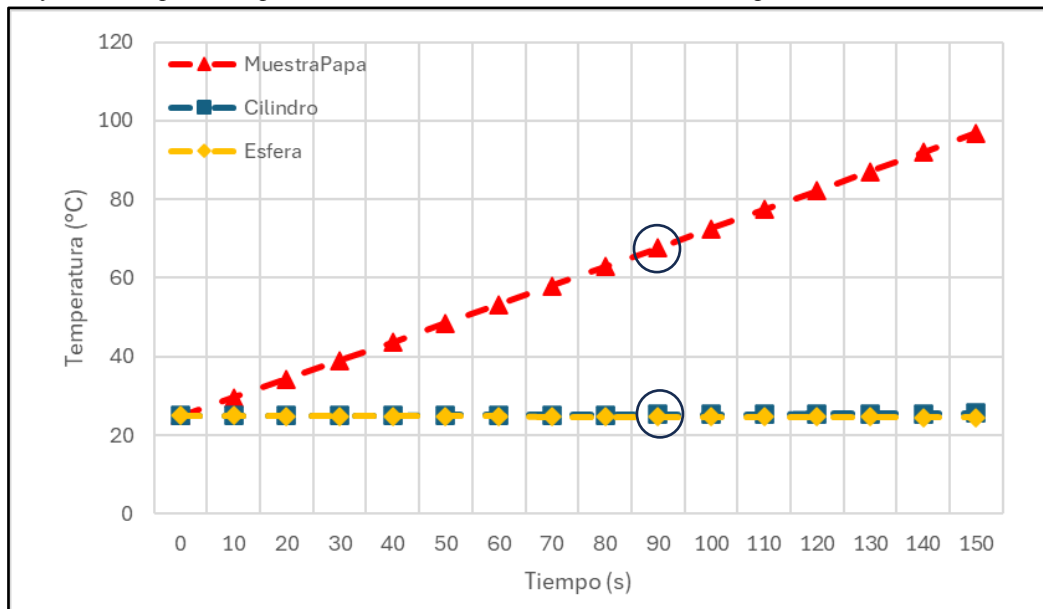
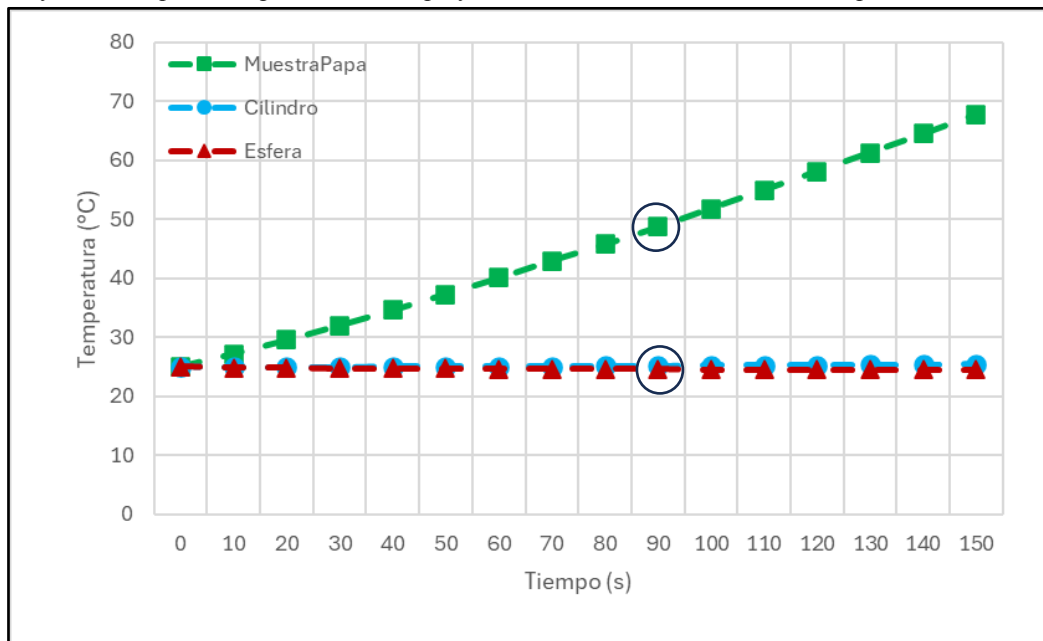


Figura 114:

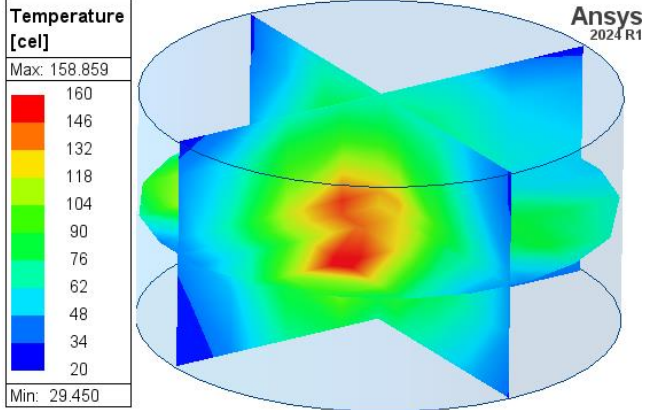
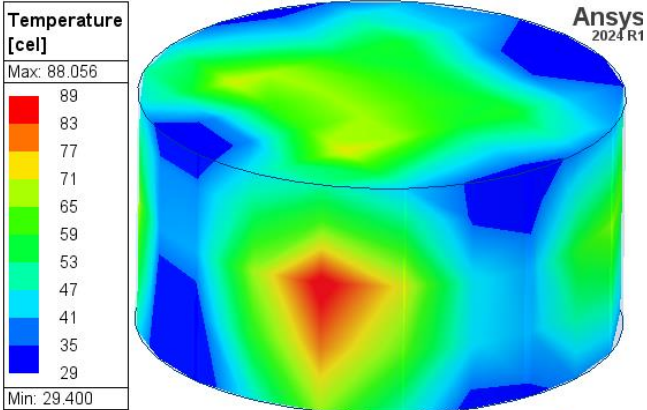
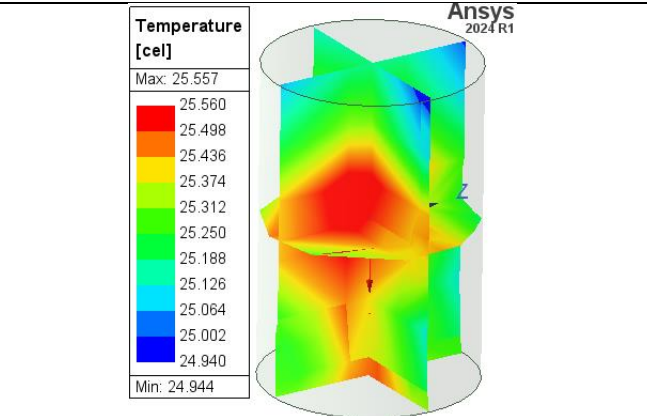
Gráfica de temperatura promedio en superficie externa de elementos tras 150 s para caso 3

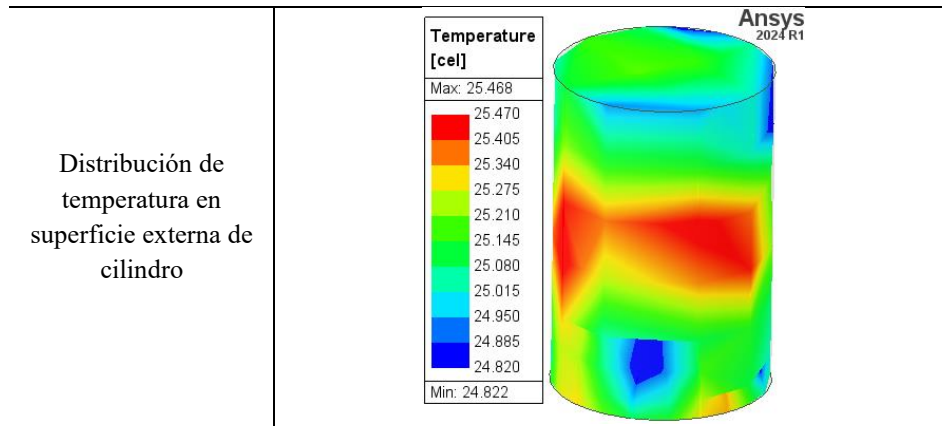


Similar que en el caso 2, la temperatura promedio en el volumen y la superficie externa de la muestra se incrementan tanto en las figuras 113 y 114. Sin embargo, se aprecia que el cilindro incluido en la simulación se mantiene casi constante, con ligera variación atribuida al proceso computacional. Por lo que, para el caso del cilindro es posible afirmar que la protección es en gran medida efectiva.

Asimismo, en la simulación se representa la distribución de temperatura en elementos como la muestra de papa y el cilindro, tanto en su volumen como en su superficie externa, con el objetivo de analizar los cambios en su comportamiento térmico, tal y como se observa en la tabla 16. Por otro lado, en el caso de la esfera, no se considera necesario realizar este ploteo, ya que su temperatura permanece constante.

Tabla 16:
Distribuciones de temperatura para caso 3 en simulación con volumen y superficie externa en elementos tras 90 s

| | |
|---|--|
| <p>Distribución de temperatura en volumen de muestra de papa</p> |  |
| <p>Distribución de temperatura en superficie externa de muestra de papa</p> |  |
| <p>Distribución de temperatura en volumen de cilindro</p> |  |



De las distribuciones de temperatura para la muestra se visualiza que la temperatura disminuyó con respecto al caso 1, ello se le atribuye a la presencia de la rejilla de protección en el sistema, dado que, restringe el paso de las microondas atribuyéndole un nuevo recorrido dentro de la cavidad. Por otro lado, en el caso 2 se denotó que el cilindro colocado al exterior de la cavidad, acoplado al puerto de salida se calentó $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y acompañado de la rejilla de protección su temperatura es casi constante, lo que significa que realmente sí cumple su función.

4.4 Evaluación energética para la muestra

En esta sección se determinará el porcentaje de absorción de energía de microondas en forma de energía térmica para la muestra de papa en el tiempo de 90 s mediante un análisis energético con las ecuaciones 26, 27 y 28:

Considerando para un tiempo de 90 segundos, la energía suministrada por el microondas comercial seleccionado es de 90 kJ . De ahí, se calcula la cantidad de energía térmica mediante las diferencias de temperaturas promedio de volumen obtenidas con respecto a la temperatura inicial de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ tras las simulaciones que consideran a la muestra de papa con masa 0.2 kg y con propiedades de agua. Finalmente, en la tabla 17 se encuentra el porcentaje de absorción para cada caso.

Tabla 17:

Resumen energético para muestra en los casos hasta 90 segundos

| Magnitud | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| $\Delta T\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ | 47.61 | 44.92 | 42.66 |
| $Q\text{ [kJ]}$ | 39.8 | 37.55 | 35.66 |
| $A\text{ [%]}$ | 44.22 | 41.72 | 39.62 |

De manera que, se observa una disminución del 4% en el porcentaje de absorción de energía entre el caso 1 del microondas original y el caso 3 que cuenta con la modificación del puerto de salida y la rejilla de protección muy probablemente por dichos cambios de geometría. No obstante, se consigue un medio para poder extraer el vapor que se podría generar al deshidratar un alimento y que provoca complicaciones en dicho proceso.

Conclusiones

Este trabajo tiene por objetivo general la evaluación e innovación de la cavidad de un horno microondas comercial con fines de aplicarlo a deshidratación por microondas con un sistema de extracción de vapor. Para ello, se analiza el comportamiento electromagnético y térmico de la cavidad y sus componentes por medio del análisis computacional. Es así como, se han tomado de referencia investigaciones previas compuestas tanto por análisis computacional como por pruebas experimentales. De manera que, se pudieron apreciar las siguientes consideraciones:

En el capítulo dos se presenta un manual que puede servir de guía para generar modelos adecuados. Es así como, se enfatiza la relevancia de los parámetros de diseño de un modelo real que deben introducirse en un programa computacional. De modo que, se evidencia la importancia de este recurso como un complemento esencial en investigaciones que involucren análisis electromagnéticos y térmicos, permitiendo una mayor precisión y eficiencia en la simulación de escenarios complejos.

En el capítulo tres se ha modelado satisfactoriamente los prototipos de los artículos científicos con el software ANSYS Electronics y sus herramientas HFSS y Icepak. Ello se denota en que se han obtenido resultados similares tanto en patrones de distribución de campo eléctrico y de distribución térmica, así como, en sus intervalos de valores. Asimismo, se ha determinado mediante un breve análisis estadístico con las métricas RMSE y error relativo máximo entre los modelos simulados en ANSYS Electronics y los modelos del artículo científico. De lo que se ha obtenido valores RMSE de 2.7, 3.7 y 6.2 °C para las simulaciones a 500, 1000 y 1500 W respectivamente y un error relativo máximo de 10 % para todas las experimentaciones, lo que corrobora la alta precisión del software utilizado.

Tras desarrollar y analizar el capítulo cuatro se comenta lo siguiente:

Para el desarrollo de los tres casos se ajustaron condiciones reales de operación de un horno microondas comercial a condiciones computacionales; tales como, el material externo metálico de la cavidad con aire interno. Para la muestra de papa se le asignó material de agua dado que es el componente principal. Luego, se han despreciado el efecto de algunos fenómenos y se ha obtenido lo siguiente por cada caso:

En el caso 1 se simuló y validó con evidencia experimental obtenida a partir de una cámara termográfica. De lo que se ha obtenido que, para 90 segundos, los rangos de temperatura oscilan entre los 80 y 85 °C en la superficie externa. Asimismo, se ha mostrado que según el valor de desfase para las distribuciones de campo eléctrico en los planos XY, XZ y YZ, la intensidad de campo eléctrico es distinta, pero con el mismo patrón de distribución.

En el caso 2 se implementó un puerto de salida para permitir la extracción del vapor generado, sin embargo, se ha considerado necesario realizar una evaluación de la fuga de microondas al exterior de la cavidad. De ahí que, las distintas vistas electromagnéticas han confirmado dicho evento de fuga. Para complementar lo evaluado se adicionó un análisis térmico demostrando así que el elemento ubicado en el puerto de salida y al exterior de la cavidad incrementó su temperatura debido a la fuga

En el caso 3 se incorporó una rejilla con el objetivo que actúe como protección a la fuga de microondas. Ello se pudo verificar en las distintas vistas electromagnéticas representadas. Para complementar lo evaluado se adicionó un análisis térmico demostrando así que el elemento ubicado en el puerto de salida no incrementó su temperatura debido a la fuga.

Finalmente, tras haber realizado el análisis energético al caso original y sus variaciones, con las diferentes modificaciones geométricas y de configuración, el porcentaje de absorción de energía de microondas en la muestra evidenciado en forma de energía térmica manifestado en el incremento de temperatura se ha visto reducido en un 4%. No obstante, se ha cumplido con el objetivo de la tesis de obtener un modelo que cuente con extracción de vapor sin riesgo para la seguridad de los usuarios.



Referencias

- Agropecuário, C. N. (2004). Guía manejo integrado de plagas en el cultivo de la papa. *Universidad Nacional Agropecuaria*, 1-60.
- Aguilar, J. (Octubre de 2001). Ingenierías. *Ingenierías*, IV(13).
- Alberdi, E. (2023). *Optimización del proceso de secado con radiación microondas de langostino aplicando el método de respuesta de superficie de respuesta*. Lima: Publicación de la Universidad Nacional del Callao.
- ANSYS, I. (2005). *User's Guide – High Frequency Structure Simulator*. ANSYS, Inc.
- ANSYS, I. (2013). *An Introduction to HFSS: Fundamental Principles, Concepts, and Use*. ANSYS, Inc.
- Clark, D., & Folz, D. (1997). Introduction: What is Microwave Processing.
- Cutillas, M. (2012). *Evaluación de transiciones Coaxiales-Guías de Onda y Antenas de Parche para la Uniformidad de Campo Eléctrico en Cavidades de Calentamiento por Microondas*. Cartagena.
- Delgado, A. M. (2013). *Guías de ondas*. UOC (Universitat Oberta de Catalunya).
- Durance, T., & Yaghmaee, P. (2011). *Microwave Dehydration of Food and Food Ingredients*. Vancouver, BC, Canadá: Elsevier.
- Fernández, Y., Fidalgo, B., Zubizarreta, L., Bermúdez, J. C., Juárez, E., Arenillas, A., & Menéndez, J. (Enero de 2010). Procesos Térmicos Asistidos por Microondas sobre Materiales Carbonosos. (16), 1-7.
- Gacitúa, J. (Setiembre de 2018). Deshidratados al vacío con microondas: Una nueva alternativa en secado de frutas, hortalizas y hierbas medicinales. *Especial Agroindustria*, 61-63.
- Gacitúa, J. (2018). Introducción al deshidratado por microondas al vacío como tecnología alternativa al secado de berries y hierbas medicinales. *Publicación de la Universidad de la Frontera*, 1-14.
- Kleinert, E. (2013). *Microwave Ovens* (Tercera ed.). McGraw-Hill Education.
- Las microondas en la industria. (1998). *Energía y computación*, VIII(14).
- Lemos, R., Mattar, B., Marsiaoli, A., & Borges, J. (2015). How to make a microwave vacuum dryer with turntable. *Food Engineering*, 276-284.
- LG. (2017). *Horno de Microondas: Manual de instrucciones modelo MH6536GIS*. LG.
- LG. (2020). *LG Tienda Oficial*. Obtenido de Magnetron EAS61382908 para horno microondas LG.
- Li, B., Fan, X., Yu, S., Xia, H., Nong, Y., Bian, J., . . . Zi, W. (2023). Microwave heating of biomass waste residues for sustainable bioenergy and biomass materials preparation: A parametric simulation study. *Energy*, 274(127347).
- Martines, E., & Lira, L. (2010). Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. *Simposio de Metrología 2010*, 1-6.
- Martinez, C., Díaz, E., & Becerra, D. Z. (2022). Horno de Microondas: Sintetizando Materiales en el Laboratorio en Un Dos por Tres. *Quimiofilia*, 1-5.
- Menéndez, Á., & Moreno, Á. (2017). *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas*. UTC (Universidad Tecnológica de Chiriquí).

- Muhammad , F., Abd , H., Normanbhay, S., Juniza, M., Ye, S., Shafirah, S., & Wan, A. (2021). Microwave-assisted Hydrothermal Carbnization for Solid Biofuel Application: A Brief Review. *Elseiver*, 1-14.
- Nisoa, M., Plodkaew, A., Sirisathitkul, C., Wattanasit , K., Somjit , B., Pacdeepin, P., & Sirisathitkul, Y. (2022). Simulation and experimentation on parameters influencing microwave-assisted extraction of rhizomes. *Alexandria Engineering Journal* , 357–366.
- Nisoa, M., Plodkaew, A., Sirisathitkul, C., Wattanasit, K., Somjit, B., Pacdeepin, P., & Sirisathitkul , Y. (2022). Simulation and experimentation on parameters influencing microwave-assisted extraction of boiactive compounds from Kaempferia parviflora rhizomes. *Alexandria University*, 357-366.
- Pozar, D. (2012). *Microwave Engineering*. Wiley.
- Rahman, A., Handoyo, W., & Prasetyo, A. (2020). A simulation study of parameters influencing microwave heating of seaweed (*Eucheuma cottonii*). *Physics: Conference Series*, 1444(1).
- Ryynänen, S. (Enero de 1995). The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles. *Food Engineering*, 26(4), 409-429.
- San Román, E., Castillo, P., Sotomayor, M., Gonzales, L., & Zenteno, E. (2018). *Teoría y Aplicaciones de Ingeniería de Microondas* (Segunda ed.). Arequipa, Perú.
- Sorrentino, R., & Bianchi, G. (2010). *Microwave and RF Engineering*. Chichester, West Sussex, Reino Unido: John Wiley & Sons.
- Stuart, N. (2015). *Dielectric Properties of Agricultural Materials and their Applications*. Elseiver.
- Zarein, M., Hashem Samadi, S., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Saudi Society of Agricultural Sciencies*, 14, 41-47.