

Estimación de la permeabilidad magnética de un material en procesos de calentamiento con microondas, mediante la solución de un problema inverso.

Magda P. Cuadros García, Jefferson A. Estévez Ramírez, Eduar F. Tirado Afanador.

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Electrónicos.

Director

Carlos Rodrigo Correa Cely

Máster y Doctor en ingeniería química.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas.

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica.

Bucaramanga

2024

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro profesor y director de proyecto, Carlos Rodrigo Correa Cely. Su compromiso, paciencia y guía han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo. Apreciamos profundamente el tiempo y la atención que nos brindó, así como su dedicación. Ha sido un verdadero privilegio aprender y trabajar a su lado, y estamos muy agradecidos por toda su ayuda y apoyo.

A todos los profesores que formaron parte de nuestro proceso estudiantil. Sus conocimientos y enseñanzas fueron primordiales para fortalecer nuestro crecimiento intelectual y personal a lo largo de nuestra trayectoria en la universidad. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en nuestro aprendizaje y desarrollo.

A mis padres, Henry y Gloria, y a mis hermanos, Erika y Leonardo, por estar presentes en cada etapa de este camino, por ayudarme, apoyarme y estar siempre conmigo, por la entrega y el compromiso y no desfallecer a pesar todo. A mis amigas de la universidad, Paola Peña e Ivón Bonilla, por su compañía, apoyo, consejos y resiliencia. A mi compañero de vida, Javier Otero, por acompañarme, apoyarme y animarme siempre a seguir luchando para cumplir esta meta. A Valentina Gaviria por estar siempre, en los buenos y sobre todo en los malos momentos, por acompañarme cada día y escucharme siempre. . Mi más profunda gratitud a la profesora Sandra Milena Fontecha por su cariño, acompañamiento y protección. Y a cada uno de mis seres queridos que me acompañaron durante mi trayecto en la universidad. (Magda Piedad Cuadros García)

Agradezco a Dios por haberme permitido cumplir esta meta de manera satisfactoria, a mis padres Alfonso y Paulina porque con su apoyo y trabajo me educaron y me apoyaron en toda mi formación profesional, a mi hermana Gina y mi cuñado Ciro quienes siempre me brindaron su

apoyo durante esta etapa, y a mi novia Camila por apoyarme y motivarme a lograrlo y aquellas personas que iniciaron este proceso conmigo. (Jefferson Alfonso Estevez Ramirez).

Primero, agradezco a Dios por ayudarnos a cumplir con este proyecto, y me agradezco a mí mismo por tener la fortaleza para seguir adelante. Quiero expresar mi gratitud a mis compañeros por el apoyo y el ánimo que nos brindamos mutuamente. Agradezco profundamente a mis padres, Marlene Afanador Ortiz y Luis Ángel Tirado, porque siempre confiaron en mí y me apoyaron incondicionalmente. Sé que cada día estuvieron igualmente pendientes de este proceso, y gracias a ellos he hecho realidad el sueño de ser ingeniero electrónico. Extiendo mi agradecimiento a los diferentes profesores que me ayudaron a formar un mejor carácter, y a mis amigos que me apoyaron cada vez que me sentía agotado. Finalmente, agradezco a mi familia en general por su continuo respaldo. (Eduar Fabián Tirado Afanador).

Dedicatoria.

A Dios por darme la fortaleza de seguir cada día, y de conseguir este logro. A mis padres Henry Cuadros Y Gloria García por su apoyo incondicional. Gracias por creer en mí y por estar siempre presentes en cada paso de este proceso, Por la resiliencia, la paciencia y el amor. Este logro no sería posible sin su amor, comprensión y paciencia. Este mérito es tanto de ustedes como mío. (Magda Piedad Cuadros García.)

A cada uno de mis seres queridos en especial a mis padres Alfonso Estévez Y Paulina Ramirez, quienes han sido mis pilares para seguir adelante, la motivación de mi vida y mi orgullo de ser lo que seré. Gracias por confiar siempre en mí. (Jefferson Alfonso Estévez Ramirez)

A mis padres y familia, mis padres Luis Angel Tirado y Marlene Afanador Ortiz, mis tías Nelly Torres y Edilia Afanador, por su apoyo incondicional por el esfuerzo de sacar adelante mi carrera, por su amor incondicional y porque cumplieron mi sueño y también su sueño de ver a su hijo convertido en un profesional, gracias por creer en mi y gracias por su amor y paciencia. (Eduar Favian Tirado Afanador).

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
3. Objetivos.....	11
3.1 Objetivo General	11
3.2 Objetivos Específicos	11
4. Metodología.....	12
5. Descripción Metodológica.....	12
5.1. Fundamentos Teóricos.....	13
5.1.2. Conceptos Previos.	13
5.2. Problema Directo.....	16
5.2.1. Calentamiento con Microondas.....	17
5.2.2. Ecuaciones Fundamentales.	18
5.2.3. Propiedades de los materiales.	20
5.3. Modelado del Problema directo.	21
5.3.1. Procedimiento.	22
5.4. Enfoque para el problema inverso.....	29
5.4.1. Solución Problema inverso.	30
5.4.2. Resultados Problema inverso.....	31
5.4.3. Discusión de resultados.	34
6. Conclusiones.....	36
Referencias	38

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades SiC.....	20
Tabla 2. <i>Propiedades Vidrio</i>	21
Tabla 3. Propiedades para simulación.....	22
Tabla 4. Condiciones iniciales	24
Tabla 5. Resultados simulación.	25
Tabla 6. SNR= 80.....	31
Tabla 7. SNR=20.....	32
Tabla 8. Resultados Estimación. μ	33
Tabla 9. Gráficas Algoritmos PSO-Genético.	34

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Etapas</i>	12
Figura 2. <i>Ondas electromagnéticas</i>	17
Figura 3. <i>Horno microondas Comercial</i>	18
Figura 4. <i>Modelado Calentamiento</i>	22
Figura 5. <i>Visualización geométrica.</i>	25
Figura 6. <i>Calidad de elementos.</i>	25
Figura 7. <i>Perfil de temperatura 3d.</i>	26
Figura 8. <i>Perfil en 2d.</i>	26
Figura 9. <i>t= 5 s</i>	27
Figura 10. <i>t= 7 s</i>	28
Figura 11. <i>t=12 s</i>	28
Figura 12. <i>80 SNR</i>	34
Figura13. <i>80 SNR</i>	34
Figura 14. <i>20 SNR</i>	35
Figura 15. <i>20 SNR</i>	35

Resumen

Título: Estimación de la permeabilidad magnética de un material en procesos de calentamiento con microondas, mediante la solución de un problema inverso.*

Autor: Magda P. Cuadros García, Jefferson A. Estévez y Eduar F. Tirado.**

Palabras Clave: propiedades dieléctricas, permeabilidad, problemas inversos, norma de los mínimos cuadrados.

Descripción: En la actualidad, la estimación precisa de propiedades de materiales se ha vuelto crucial para optimizar procesos industriales, reduciendo costos asociados a fallos y minimizando la necesidad de pruebas físicas. A través de simulaciones avanzadas, no solo se mejora la eficiencia en la detección de problemas, sino que también se contribuye significativamente al cuidado del medio ambiente, al evitar el uso excesivo de materiales y energía en pruebas experimentales. Este trabajo se enfoca en la estimación de la permeabilidad magnética del carburo de silicio (SiC), un material clave en la electrónica de potencia debido a su alta eficiencia, capacidad de soportar altas temperaturas y excelente conductividad térmica. Estas propiedades hacen del SiC un componente fundamental en el desarrollo de dispositivos electrónicos de alto rendimiento y bajo consumo energético. El problema inverso es abordado mediante la aplicación de algoritmos de optimización, como el PSO (Particle Swarm Optimization), logrando estimaciones precisas mediante la minimización de errores en modelos simulados.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. PhD. Ingeniería Química.

Abstract

Title: Estimation of the magnetic permeability of a material in microwave heating processes by solving an inverse problem.***

Author(s): Magda P. Cuadros García, Jefferson A. Estévez y Eduar F. Tirado.****

Key Words: dielectric properties, permeability, inverse problems, least squares rule.

Description: Nowadays, accurate estimation of material properties has become crucial to optimize industrial processes, reducing costs associated with failures and minimizing the need for physical testing. Advanced simulations not only improve the efficiency of problem detection, but also contribute significantly to environmental protection by avoiding the excessive use of materials and energy in experimental tests. This work focuses on the estimation of the magnetic permeability of silicon carbide (SiC), a key material in power electronics due to its high efficiency, capability to withstand high temperatures and excellent thermal conductivity. These properties make SiC a fundamental component in the development of high-performance, low-power electronic devices. The inverse problem is addressed by applying optimization algorithms, such as Particle Swarm Optimization (PSO), achieving accurate estimates by minimizing errors in simulated models. The combination of these methods offers innovative and sustainable solutions, facilitating new opportunities in research and technological development.

*** Thesis.

**** Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director. Carlos Rodrigo Corra Cely. PhD. Ingeniería Química.

Introducción

En la industria moderna, la capacidad de estimar con precisión las propiedades internas de los materiales sin recurrir a pruebas destructivas es un desafío crucial que, además, ayuda a reducir costos y mejorar la eficiencia de los procesos. Este proyecto se centra en la estimación de la permeabilidad magnética del carburo de silicio (SiC), un material relevante en la electrónica de potencia debido a su alta resistencia térmica y excelente conductividad bajo condiciones extremas. El estudio comienza con el modelado del problema directo, que implica simular el comportamiento térmico del SiC cuando se somete a calentamiento con microondas. Utilizando ecuaciones de transferencia de calor y técnicas de elementos finitos, se obtienen perfiles de temperatura que describen la evolución del calor en el material. Estos perfiles sirven como base para entender el fenómeno y obtener los datos sintéticos necesarios para resolver el problema inverso.

La solución del problema inverso permite estimar propiedades como la permeabilidad magnética del SiC a partir de los perfiles de temperatura obtenidos. Para ello, se emplea el método de los mínimos cuadrados, que minimiza la diferencia entre las temperaturas simuladas y las observadas, proporcionando un ajuste preciso. Sin embargo, dada la complejidad del problema, se recurre al algoritmo de optimización PSO (Particle Swarm Optimization), que permite explorar el espacio de soluciones de manera eficiente, ajustando los parámetros del modelo para lograr una estimación óptima.

Este proyecto integra simulaciones avanzadas, métodos numéricos y algoritmos de optimización para abordar un desafío crítico en el campo de la electrónica y los materiales. Los resultados no solo contribuyen a la comprensión de las propiedades del SiC, sino que también abren nuevas

oportunidades para el diseño de procesos más sostenibles, reduciendo el impacto ambiental y mejorando la eficiencia energética en aplicaciones industriales.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Aplicar técnicas de problemas inversos para estimar la permeabilidad magnética de un material dieléctrico en procesos de calentamiento con microondas.

3.2 Objetivos Específicos

Proponer el modelo matemático que describe el calentamiento con microondas de materiales con propiedades dieléctricas conocidas.

Resolver el modelo matemático mediante elementos finitos conociendo todas sus propiedades termofísicas y eléctricas.

Proponer el planteamiento del problema inverso que permita estimar las propiedades como la permeabilidad magnética, tomando como ejemplo el carburo de silicio y a partir de los datos obtenidos mediante mediciones sintéticas.

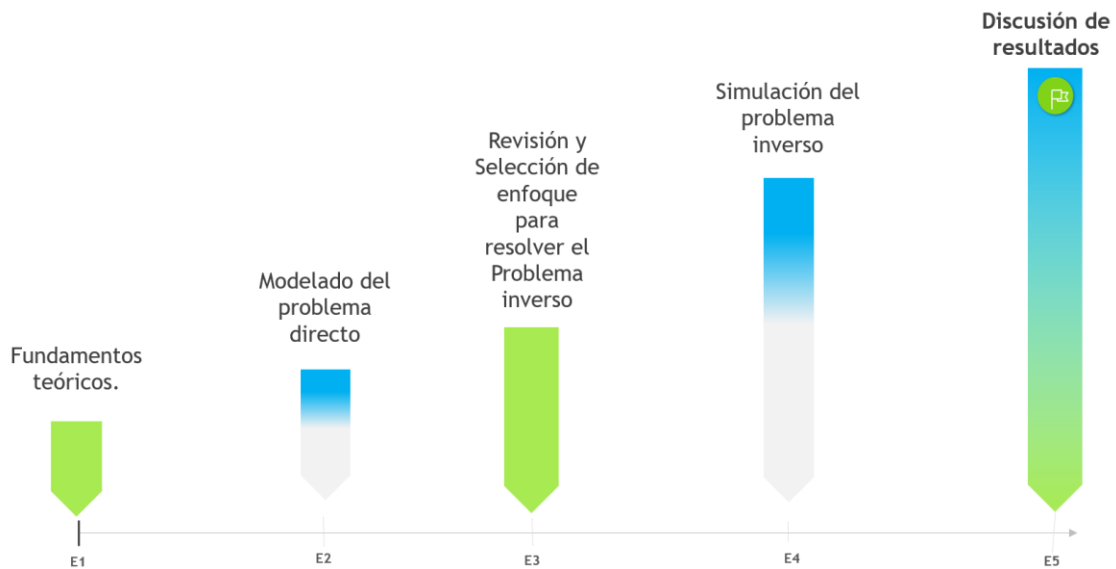
implementar y desarrollar el modelo matemático y el problema inverso en MATLAB.

4. Metodología

La metodología planteada para el desarrollo del proyecto consiste en cinco etapas.

Figura 1.

Etapas



5. Descripción Metodológica

Las cinco etapas descritas para el desarrollo del proyecto fueron fundamentales para abordar de manera efectiva el problema planteado, ya que requería un análisis exhaustivo de conceptos teóricos y las herramientas necesarias para su solución. Cada etapa, desde el referente conceptual hasta la implementación de algoritmos de optimización, fueron diseñadas con el fin de

garantizar la comprensión del fenómeno de calentamiento por microondas y la solución del problema inverso, utilizando técnicas de simulación y optimización.

5.1. Fundamentos Teóricos.

En esta sección se investigaron y analizaron los conceptos fundamentales que sustentan el desarrollo del presente proyecto. Estos conceptos son esenciales para comprender el fenómeno de calentamiento por microondas en materiales como el carburo de silicio, así como el comportamiento de los materiales en presencia de campos magnéticos. Además, se revisaron las propiedades dieléctricas de los materiales y su relación con los campos electromagnéticos, la interacción microondas-material, la absorción de energía y la generación de calor. También se abordó el concepto de problemas inversos, sus aplicaciones, métodos de solución, y los algoritmos de optimización empleados para resolver este tipo de problemas.

5.1.2. Conceptos Previos.

Calentamiento con microondas: el calentamiento con microondas es una técnica ampliamente en la actualidad para diversas aplicaciones, como el calentamiento de alimentos, procesos industriales, medicina, tratamiento de materiales e investigación científica, entre otros. El calentamiento por microondas se basa en la interacción de las moléculas de los materiales * con las microondas, lo que provoca una excitación molecular y, en consecuencia, una generación de

* Materiales compuestos que pueden tener una variación gradual de las propiedades magnéticas a lo largo de su estructura, lo que facilita la solución del problema inverso.

calor. Esta interacción permite un calentamiento rápido y eficiente, adaptándose a las necesidades específicas de cada aplicación. (Moreno, 2017)

Propiedades dieléctricas: son características de materiales que reaccionan ante un campo electromagnético. Estas propiedades incluyen la constante dieléctrica, que mide la capacidad del material para almacenar energía eléctrica, y la pérdida dieléctrica, que indica cuánta energía del campo electromagnético es convertida en calor.

Interacción Microondas-Materia: Es un proceso mediante el cual las microondas, en forma de radiación electromagnética interactúan con las moléculas de los materiales, las microondas hacen que vibren las moléculas dentro del material generando fricción interna y produciendo calor. (Sun J, 2016)

Permeabilidad Magnética: Es la propiedad de los materiales que mide su capacidad para reaccionar ante un campo magnético, es decir, cómo un material se magnetiza en respuesta a la presencia de un campo magnético externo. Representa la facilidad con la que las líneas de flujo magnético pueden atravesar un material cuando se encuentra expuesto a estos campos.

Carburo de Silicio: Aunque el carburo de silicio^{**} no es estrictamente un material dieléctrico, se ha seleccionado para este proyecto debido a su capacidad de absorción^{***} de microondas^{****}. Además, es un material ampliamente utilizado en la industria electrónica por sus propiedades excepcionales, como su alta conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas y

^{**} Carburo de silicio: Material utilizado en diversas aplicaciones debido a su alta dureza, resistencia a altas temperaturas y buenas propiedades eléctricas.

^{***} Capacidad de absorción: habilidad del material para retener energía.

^{****} Microondas: Radiación con longitudes de onda corta y frecuencias altas, comprendidas entre los 300 MHz a 300 GHz.

estabilidad química. Estas características lo hacen ideal para aplicaciones en las que la interacción con microondas es relevante. (Arrow, 2023)

Estimación: proceso de determinar un valor aproximado o similar de una cantidad, propiedad o fenómeno, considerando datos experimentales o métodos teóricos. Este enfoque permite realizar análisis basadas en la información disponible.

Problemas Inversos: Proceso de encontrar una causa a partir de los resultados observados. En este proceso, se parte de la solución conocida para identificar un factor específico que pudo haber influido en el fenómeno observado.

Problemas inversos de transferencia de calor: Problemas que buscan determinar parámetros o propiedades de materiales desconocidos relacionados con el calor a partir de mediciones o resultados observables. (Duda, 2005)

Método de los mínimos Cuadrados: Procedimiento que busca dar solución a la suma de las diferencias entre datos observados y datos predichos por un modelo, lo cual permite ajustar los datos del modelo analizado de manera óptima. (Estadística, 2024)

Algoritmos Metaheurísticos: Procesos diseñados para resolver problemas de optimización complejos mediante la búsqueda de soluciones aproximadas en un tiempo razonable. Aunque no garantiza encontrar la solución óptima, busca acercarse lo más posible a la mejor solución disponible.

Algoritmo PSO: Método de optimización ***** basado en el comportamiento de grupos, compuesto por partículas que ajustan su posición según su mejor experiencia individual y la del grupo, buscando una solución óptima de forma cooperativa una solución óptima. (Greistorfer, 2007)

5.2. Problema Directo.

En este capítulo, se describe el proceso de simulación del calentamiento de materiales utilizando un horno comercial. Iniciaremos con una revisión de los principios teóricos que fundamentan el calentamiento con microondas, resaltando las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor que constituyen la base de nuestro modelo. Estas ecuaciones son cruciales para comprender cómo se distribuye el calor en los materiales durante el proceso de calentamiento.

Asimismo, abordaremos la importancia de la herramienta MATLAB en la realización de estas simulaciones, destacando su capacidad para manejar complejas operaciones matemáticas y su utilidad en la visualización de resultados. Además, se discutirán las propiedades específicas del carburo de silicio, el material seleccionado para nuestra simulación, resaltando su relevancia en el contexto del calentamiento por microondas y su comportamiento térmico.

***** Método de optimización: Es una técnica matemática e instrucciones bien definidas que se utilizan para encontrar la mejor solución a un problema.

A través de este capítulo, buscamos proporcionar una comprensión clara de cómo se modela el problema directo del calentamiento, sentando las bases para las etapas posteriores del proyecto que implican la estimación de parámetros y la resolución de problemas inversos.

5.2.1. Calentamiento con Microondas.

Los hornos microondas comerciales operan a diferentes frecuencias dentro del rango de las microondas. Para este proyecto, la frecuencia utilizada en la simulación es de 2450 MHz. Las ondas electromagnéticas representan la propagación de perturbaciones en un medio, involucrando el transporte de energía. Estas ondas son la combinación de campos eléctricos y magnéticos generados por cargas en movimiento. (2., 2012)

El componente crucial que genera estas microondas en un horno es el magnetrón. Este dispositivo convierte la energía eléctrica en ondas electromagnéticas mediante un proceso de resonancia. Al pasar corriente eléctrica a través de un campo magnético, el magnetrón produce electrones que se mueven en un patrón circular, generando microondas en la frecuencia deseada. Estas microondas se dirigen luego hacia la cavidad del horno, donde interactúan con los materiales.

Figura 2.

Ondas electromagnéticas

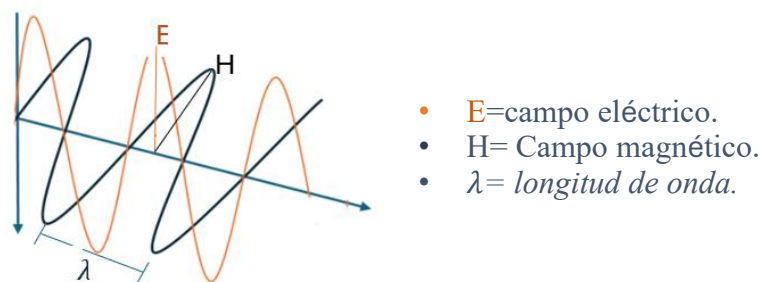
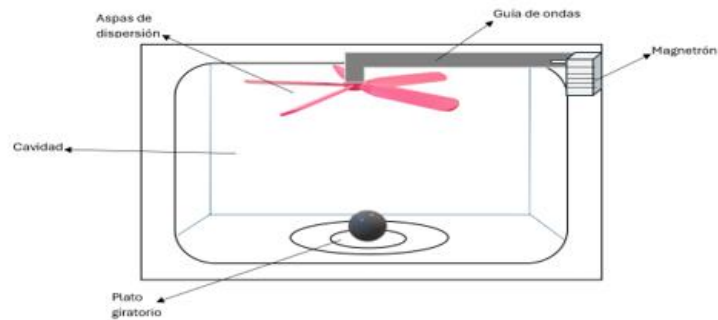


Figura 3..*Horno microondas Comercial***5.2.2. Ecuaciones Fundamentales.**

En el modelado del proceso de calentamiento con microondas comercial, se consideraron dos conjuntos fundamentales de ecuaciones: las ecuaciones de Fourier y las ecuaciones de Maxwell, esenciales para comprender y describir los fenómenos de transferencia de calor y propagación de ondas electromagnéticas.

Ecuaciones de Fourier: son las que describen el proceso de conducción de calor en el material, proporcionando el entorno matemático para modelar la distribución y transferencia de calor. La ley de Fourier demuestra como el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura, permitiendo determinar cómo varía la temperatura en el tiempo y en el espacio dentro del material.

Ecuaciones de Maxwell: Estas ecuaciones son fundamentales para el entendimiento del comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, describiendo cómo las ondas

electromagnéticas se propagan y cómo interactúan con los materiales. Permiten analizar la interacción que provoca la excitación de las moléculas del material, lo que, a su vez, genera calor.

Transferencia de calor: Proceso que utiliza ondas electromagnéticas que hace vibrar las moléculas y así generar calor a través de la fricción a nivel molecular, el análisis y modelado del calentamiento parte de la primera ley de la termodinámica descrita en la ecuación 1. (Singh, 2016)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right] + g(r, \theta, \varphi, t) \quad (1)$$

ρ = Densidad del material $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

C_p = Capacidad Calorífica del material $\left[\frac{J}{Kg * K} \right]$

k = Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m * K} \right]$

T = Temperatura [K]

t = tiempo [s]

$g(r, \theta, \varphi, t)$ = Generación volumétrica de calor. $\left[\frac{W}{m} \right]$

Potencia Disipada: debido a la interacción del campo magnético con el material se pierde energía ya que se convierte en calor dentro del material calentado, la siguiente ecuación refleja la potencia disipada por unidad de volumen en el material. Esta pérdida de energía es fundamental para el proceso de calentamiento por microondas, ya que determina la eficiencia del mismo y cómo se distribuye el calor en el material.

$$P = w * \mu'' * \mu * H^2 \quad (2)$$

$$P = \text{Pérdida de potencia} \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

$$w = \text{Frecuencia} [H_z]$$

$$\mu'' = \text{Permeabilidad efectiva} \left[\frac{H}{m} \right]$$

$$\mu = \text{Permeabilidad en el vacío} \left[\frac{H}{m} \right]$$

$$H = \text{intensidad de campo magnético} \left[\frac{A}{m} \right]$$

5.2.3. Propiedades de los materiales.

Tabla 1.

Propiedades SiC..

Propiedades del carburo de silicio

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad de masa	3210	$\frac{Kg}{m^3}$
Calor específico	700	$\frac{J}{Kg * K}$
Conductividad Térmica	120-230	$\frac{W}{m * K}$

Nota .Fuente: thermal-engineering.org

Tabla 2.*Propiedades Vidrio.*

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad de masa	2500	$\frac{Kg}{m^3}$
Calor específico	840	$\frac{J}{g * K}$
Conductividad Térmica	1.05	$\frac{W}{m * K}$

Nota. Fuente. thermal-engineering.org

5.3. Modelado del Problema directo.

El modelado del proceso de calentamiento con microondas comercial se llevó a cabo utilizando en software MATLAB, esta herramienta es reconocida por su capacidad de realizar simulaciones complejas y su flexibilidad en el manejo de ecuaciones matemáticas, proporcionando un entorno robusto para la simulación del comportamiento del calentamiento de manera efectiva. La capacidad para manejar cálculos matriciales y ecuaciones diferenciales es esencial para modelar la transferencia de calor en el material.

MATLAB permite la manipulación de variables y parámetros según las condiciones permitiendo adaptar el modelo a diferentes propiedades y geometrías para analizar el comportamiento del calentamiento. El código utilizado para la solución del problema directo fue

proporcionado por el profesor y director del proyecto, Carlos Rodrigo Correa Cely, y posteriormente adaptado a las necesidades. Se realizaron modificaciones específicas en el código original para ajustarlo a las características del problema, lo que permitió generar datos sintéticos que sirvieron como base para las simulaciones y el posterior análisis del problema inverso.

5.3.1. Procedimiento.

Figura 4.

Modelado Calentamiento



➤ Se definieron parámetros relevantes de los materiales, estos fueron relevantes para la precisión del modelo.

Tabla 3.

Propiedades para simulación.

Parámetro	Capa interna	Capa Externa
Densidad $\frac{kg}{m^3}$	3.2	2.4
Conductividad térmica $\frac{W}{m * k}$	130	1.2

<i>Calor específico</i> $\frac{J}{kg * K}$	700	0.8
<i>Radio</i> m	0.060	0.12
<i>Permeabilidad magnética en el vacío</i> μ	$4\pi \times 10^{-7}$	-
$\frac{H}{m}$		
<i>Permeabilidad magnética efectiva</i> μ''	0.999	-
$\frac{H}{m}$		

 Implementación:

Se desarrolló un modelo térmico transitorio utilizando las herramientas proporcionadas por MATLAB, específicamente la toolbox PDE, que permite resolver problemas de ecuaciones en derivadas parciales mediante métodos numéricos. Para abordar el problema de transferencia de calor, se implementó la solución numérica utilizando el método de elementos finitos. Se establecieron condiciones iniciales y de frontera adecuadas para simular el proceso de calentamiento.

La fuente de calor interna se calculó en función de la potencia disipada en el carburo de silicio (SiC), considerando la frecuencia de operación y el campo magnético aplicado. Se evaluaron las tasas de flujo de calor y se realizaron visualizaciones para analizar los perfiles de

temperatura generados. Finalmente, se añadió ruido a los datos de temperatura obtenidos en el modelado con el fin de generar los datos necesarios para abordar el problema inverso.

► Ejecución de la simulación.

Para el desarrollo de la simulación, se modeló una esfera de dos capas, donde la capa interna está compuesta de carburo de silicio (SiC) y la capa externa de vidrio, que actúa como un protector del SiC. Se establecieron condiciones iniciales de temperatura, así como condiciones de contorno que simulan el calentamiento en el entorno generado dentro del microondas. Estos parámetros fueron esenciales para evaluar la transferencia de calor entre las capas y su disipación en el material. Teniendo en cuenta que no se realizará toma de datos experimentales se añade a los datos de temperatura ruido, esto con el fin de realizar el análisis y obtener datos sintéticos para dar solución al problema.

Tabla 4.

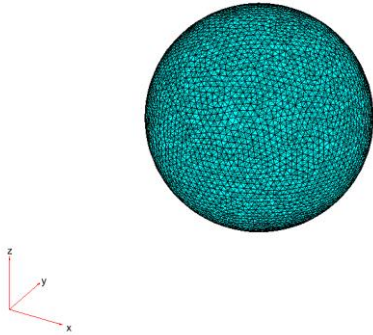
Condiciones iniciales

Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura	25	°C
Diámetro SiC	6	cm
Diámetro Vidrio	12	cm

➤ Resultados.

Tabla 5.

Resultados simulación.

Ilustraciones	Descripción
<p>Figura 5. <i>Visualización geométrica.</i></p> 	<p>Discretización del dominio mediante el método de elementos finitos con una malla de tamaño 0.7, lo que permite calcular las propiedades físicas en pequeñas regiones y puntos específicos del material, mejorando así la precisión de los resultados obtenidos. Esta malla facilita la captura de variaciones locales en las propiedades, lo que es esencial para un análisis detallado del comportamiento térmico del sistema.</p>
<p>Figura 6. <i>Calidad de elementos.</i></p>	<p>El diagrama de calidad de elementos mostrado proporciona información sobre la precisión y</p>

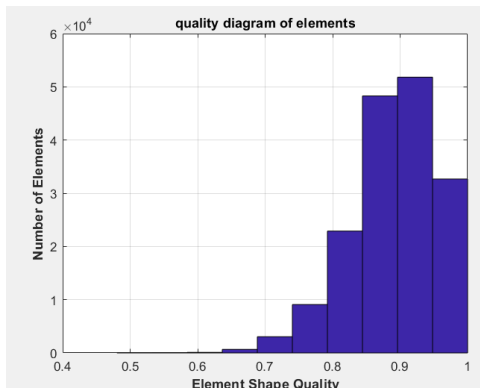


Figura 7.

Perfil de temperatura 3d.

$t = 1$ s.

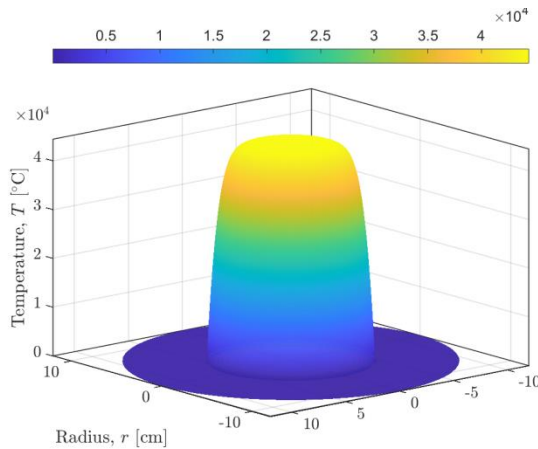


Figura 8.

Perfil en 2d.

estabilidad de la simulación, en la gráfica se observa que la mayoría de los datos esta entre 0.9 y 0.95, rango que refleja una alta calidad en la formación geométrica de los elementos de la malla, dando fiabilidad de los resultados obtenidos en la simulación.

Perfiles de temperatura mostrando la distribución de la temperatura en diferentes regiones de la esfera y tiempo determinado. Se puede observar como la temperatura aumenta hacia el centro de la esfera, evidenciando el calor más intenso en esta zona y se distribuye en función del radio, disminuyendo a medida que se aleja del centro.

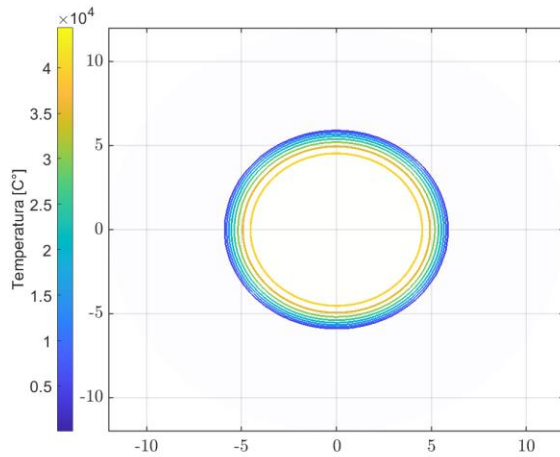
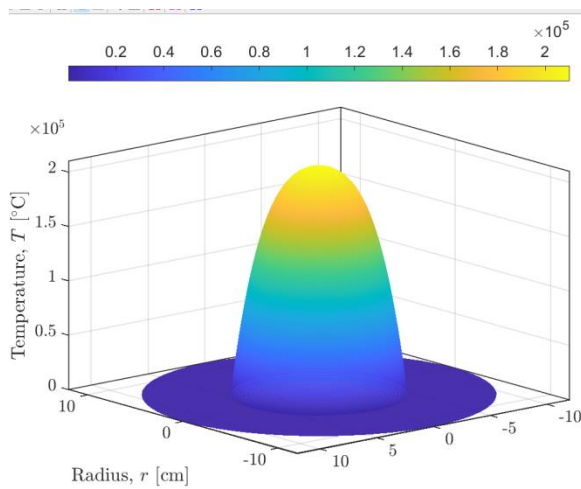


Figura 9.

$t = 5 \text{ s.}$



se muestra el perfil de temperatura a los 5 y 7 segundos respectivamente de calentamiento, evidenciando una clara distribución radial de la temperatura en la esfera. Se observa que la temperatura continúa aumentando hacia el centro, con anillos concéntricos que indican las zonas de temperaturas crecientes. Se observa un proceso de transferencia de calor más uniforme, donde las capas exteriores comienzan a calentarse tras el incremento inicial del calor

en el centro. La representación en contornos proporciona una visualización clara de los niveles de temperatura y su distribución radial.

Figura 10.

$t = 7 \text{ s.}$

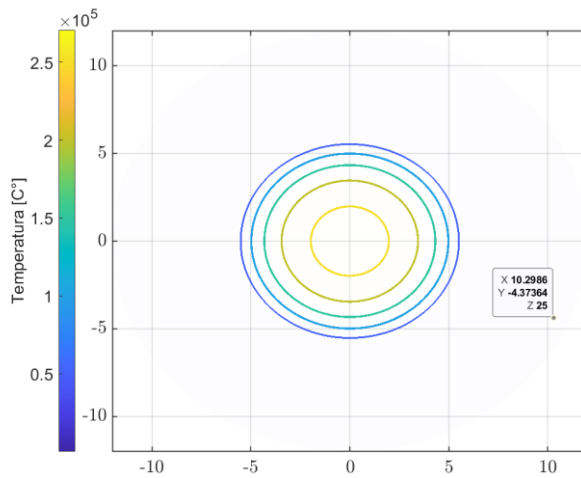
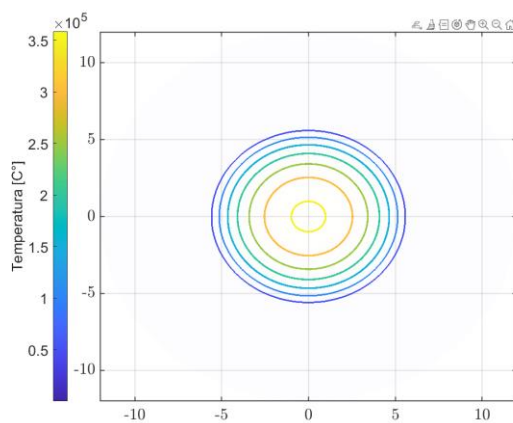


Figura 11.

$t = 12 \text{ s.}$



A los 12 segundos se llega al tiempo máximo de calentamiento, se observa que el calor no se ha distribuido más allá de los anillos de la capa interna, lo que indica que las condiciones de frontera se encuentran bien definidas y que el modelo está funcionando correctamente.

Al simular variando parámetros y propiedades se llega a la solución mostrada en la tabla anterior, se obtienen perfiles de temperatura sin y con ruido para así extraer los datos tanto sintéticos como predichos.

5.4. Enfoque para el problema inverso.

Para abordar el problema inverso, se inició con una exhaustiva investigación sobre los métodos disponibles para su solución. Tras revisar diversos documentos y literatura técnica, se determinó que el método más adecuado para resolver el problema inverso en este contexto es el método de la suma de los mínimos cuadrados. (DILLO, 2022) Este método permite minimizar la diferencia entre los datos experimentales y las predicciones del modelo, facilitando así la estimación precisa de parámetros desconocidos, como la permeabilidad magnética del material (SiC).

$$\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (3)$$

$x_i = \text{temperaturas sintéticos}$

$y_i = \text{temperaturas predichas}$

Utilizando los conjuntos de datos obtenidos, se logra estimar el parámetro de la permeabilidad magnética del material de manera precisa, minimizando el error entre las temperaturas estimadas y las temperaturas medidas. Este proceso se fundamenta en el método de mínimos cuadrados, que permite evaluar y ajustar la diferencia entre los datos sintéticos y las predicciones del modelo.

Este método se complementa con el algoritmo de enjambre de partículas (PSO), que se basa en la inteligencia colectiva de grupos. PSO es especialmente útil para abordar problemas inversos, ya que optimiza la búsqueda de parámetros en espacios de soluciones complejos. (Blum) La combinación del método de mínimos cuadrados y el PSO proporciona un enfoque robusto y eficaz para la estimación de parámetros, permitiendo obtener resultados confiables en el análisis de la permeabilidad magnética del material.

5.4.1. Solución Problema inverso.

Para resolver el problema inverso del proyecto, se toma como función objetivo la expresión del método de los mínimos cuadrados, que sirve como base fundamental para abordar la solución. Este método permite cuantificar el error entre las temperaturas sintéticas y las estimadas por el modelo, facilitando así la identificación de los parámetros desconocidos, como la permeabilidad magnética del material.

Se implementa el algoritmo de enjambre de partículas (PSO), que busca minimizar la función objetivo ajustando el parámetro dentro de un rango predefinido. Se establecen límites

inferiores y superiores para garantizar que los resultados se mantengan dentro de un rango físico plausible. A medida que se realizan las iteraciones, los datos se actualizan en posición y velocidad, buscando así el valor óptimo que minimice el error entre las temperaturas.

La iteración final proporciona el valor ajustado de la permeabilidad magnética del carburo de silicio y evalúa la eficacia del ajuste mediante la comparación de los resultados obtenidos.

5.4.2. Resultados Problema inverso.

Se realizaron simulaciones con diferentes niveles de ruido y un total de 30 iteraciones para la estimación de la permeabilidad magnética. A lo largo de estas pruebas, variando diversas propiedades del sistema, se observó que la solución tendía a acercarse consistentemente al valor de la permeabilidad utilizado en el problema directo para generar los datos sintéticos. Esto sugiere que el enfoque implementado es efectivo y robusto para la estimación de parámetros en el contexto del problema inverso.

A continuación, se anexan las tablas con las iteraciones realizadas.

Tabla 6.

SNR= 80..

Iteration	f-count	Best f(x)	Mean f(x)	Stall iterations
0	20	1.164e+07	1.057+11	0
1	40	1.164e+07	1.23e+11	0
2	60	4.517e+06	4.007e+10	0
3	80	2.556e+05	1.263e+09	0
4	100	1.465e+05	2.847e+07	0
5	120	1.465e+05	1.357e+07	1
6	140	1.204e+05	1.904e+07	0

7	160	1836	1.412e+07	0
8	180	1836	1.882e+07	1
9	200	1836	2.625e+07	2
10	220	1836	2.35e+07	3
11	240	1836	2.336e+07	4
12	260	1836	2.763e+07	5
13	280	1836	2.69e+07	6
14	300	1836	1.29e+07	7
15	320	1836	5.634e+06	8
16	340	1836	2.269e+06	9
17	360	1836	4.505e+05	10
18	380	37.52	3.212e+05	0
19	400	37.52	1.631e+05	1
20	420	0.5214	6.919e+04	0
21	440	0.5214	4.866e+04	1
22	460	0.01149	3.379e+04	0
23	480	0.01149	4742	1
24	500	0.01149	2517	2
25	520	0.01149	352.9	3
26	540	0.01149	259.9	4
27	560	0.01149	308	5
28	580	0.01149	232.9	6
29	600	0.01149	239.2	7
30	620	0.01149	217.4	8

Tabla 7.

SNR=20.

Iteration	f-count	Best f(x)	Mean f(x)	Stall iterations
0	20	2.048e+08	9.994e+10	0
1	40	2.804e+06	1.002e+11	0
2	60	2.804e+06	5.219e+09	1
3	80	5.347e+06	2.69e+07	0
4	100	5.347e+06	2.629e+07	1
5	120	3.138e+04	1.964e+07	0
6	140	3.138e+04	4.555e+07	1

7	160	738.5	3.52e+07	0
8	180	738.5	1.496e+07	1
9	200	738.5	2.318e+07	2
10	220	738.5	2.757e+07	3
11	240	738.5	4.146e+07	4
12	260	738.5	3.276e+07	5
13	280	738.5	2.081e+07	6
14	300	738.5	1.184e+07	7
15	320	738.5	3.41e+06	8
16	340	738.5	2.521e+06	9
17	360	738.5	1.226e+06	10
18	380	34.14	9.126e+05	0
19	400	17.76	6.464e+04	0
20	420	14.72	5.064e+04	0
21	440	14.72	1.851e+04	1
22	460	10.31	9926	0
23	480	3.343	2718	0
24	500	3.343	1492	1
25	520	1.598	774.7	0
26	540	1.598	329.1	1
27	560	1.053	234.8	0
28	580	1.053	228.5	1
29	600	1.053	238.4	2
30	620	0.5063	136	0

Tabla 8.

Resultados Estimación. μ .

SNR	μ real	μ estimada	unidad
80 [dB]	0.99	0.98987	$\frac{H}{m}$
20 [dB]	0.99	0.99002	$\frac{H}{m}$

5.4.3. Discusión de resultados.

Las gráficas muestran el comportamiento de las simulaciones con diferentes niveles de ruido (20 dB y 80 dB) y 30 iteraciones para la estimación de la permeabilidad magnética del carburo de silicio (SiC), evidenciando cómo el valor de la permeabilidad magnética se ajusta progresivamente a lo largo de las iteraciones, acercándose cada vez más al valor óptimo. Además, se realiza una comparación con el algoritmo genético, lo que permitió analizar el rendimiento de ambos métodos en términos de velocidad de convergencia y precisión.

Tabla 9.

Gráficas Algoritmos PSO-Genético.

PSO	GENÉTICO
Figura 12.	Figura13.
<i>80 SNR</i>	<i>80 SNR</i>

Figura 14.

20 SNR

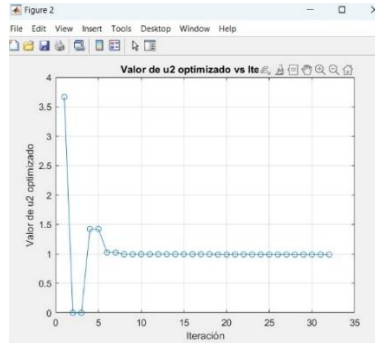
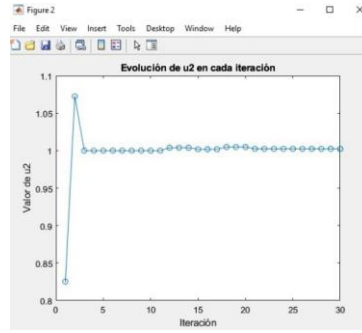


Figura 15.

20 SNR



Con SNR de 80, se evidencia que el PSO se ajusta rápidamente al valor más cercano a la permeabilidad. En el genético el ajuste oscila más en las primeras iteraciones. La precisión en el PSO es mejor, ya que se acerca más al valor óptimo, mientras que, aunque el genético logra una buena aproximación, no alcanza la misma exactitud.

Con SNR de 20 dB, se observa una mayor variación en las primeras iteraciones en ambos algoritmos. Aunque el PSO logra converger a un valor muy cercano al óptimo de la permeabilidad del carburo de silicio (SiC), lo hace tomando más tiempo. Por otro lado, en el caso del algoritmo genético, también se manifiestan mayores variaciones y se evidencia el impacto del ruido, resultando en una estimación menos precisa de la permeabilidad y mostrando inestabilidad en la búsqueda de este valor.

6. Conclusiones.

La simulación para los datos sintéticos permitió obtener información valiosa y observar el comportamiento del fenómeno asociado al calentamiento con microondas. Esto resulta beneficioso para la investigación, ya que facilitó la comprensión de los mecanismos térmicos involucrados y permitió validar modelos teóricos sin la necesidad de realizar costosos experimentos físicos. Al replicar condiciones de calentamiento en un entorno controlado, se pudieron explorar diferentes escenarios y parámetros, lo que abre oportunidades para optimizar procesos y desarrollar nuevos materiales utilizados en aplicaciones industriales. Además, esta metodología contribuye a reducir el impacto ambiental al disminuir el consumo de recursos durante las fases de prueba y validación.

Se logra implementar el problema inverso, el cual fue abordado gracias a las herramientas que ofrece MATLAB, proporcionando un entorno robusto para la realización de simulaciones complejas y dando resultados óptimos al desarrollar los algoritmos. Además, el uso de simulaciones para identificar fallas es crucial en el entorno de la electrónica y la industria, ya que disminuye costos al evitar la necesidad de realizar pruebas físicas extensivas y reduce el tiempo de desarrollo de productos. Este enfoque no solo mejora la eficiencia en la detección de problemas, sino que también permite una respuesta más rápida ante posibles fallos, contribuyendo a un diseño más seguro y confiable de dispositivos electrónicos.

El estudio de la permeabilidad magnética del carburo de silicio (SiC) es fundamental en la industria electrónica, gracias a sus excepcionales propiedades térmicas y eléctricas. A través de simulaciones, es posible explorar diversas configuraciones y características del SiC sin la

necesidad de realizar experimentos físicos, lo que acelera significativamente el proceso de diseño y optimización de dispositivos electrónicos. Esto no solo mejora la eficiencia del desarrollo, sino que también reduce costos y el impacto ambiental asociado a la producción.

Abordar el problema inverso mediante el uso de datos sintéticos permitió estimar con precisión la permeabilidad magnética del carburo de silicio (SiC). Al comparar los algoritmos de optimización, se evidenció que el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) ofrece resultados superiores en términos de convergencia y precisión en la estimación de la permeabilidad magnética, en comparación con el algoritmo genético. Esta ventaja del PSO resalta su utilidad y efectividad en la resolución de problemas complejos.

Referencias

- 2., F. U. (2012). *Openstax*. Obtenido de <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/prefacio>
- Arrow. (2023). Obtenido de <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/silicon-carbide-the-future-of-power>
- Blum, E. A. (s.f.). *Optimization Techniques For Solving Complex Problems*. 2009: WILEY.
- DILLO, F. V. (2022). Ajuste de curvas por mínimos cuadrados. En F. V. DILLO, *Una introducción a los problemas de mínimos cuadrados* (pág. 2). Departamento de matemáticas de la UPV/EHU.
- Duda, J. T. (2005). *Solving Direct and Inverse Heat Conduction Problems*. Kraków: Springer.
- Estadística, P. y. (2024). *Academia Balderix*. Obtenido de <https://www.probabilidadyestadistica.net/minimos-cuadrados/>
- Greistorfer, K. F. (2007). *Metaheuristics*. Springer.
- Moreno, J. A. (2017). *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas*. España.
- Singh, S. J.-u. (07 de 06 de 2016). *Analytical Solution for Three-dimensional, Unsteady Heat Conduction in a Multilayer Sphere*. Obtenido de ASME DIGITAL COLLECTION: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1115/1.4033536>
- Sun J, W. W. (2016). Revisión sobre los fundamentos de la interacción microondas-materia y las estrategias eficientes de calentamiento asociadas a las microondas. *Materiales (Basilea)*.