



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**Simulación y validación de la transferencia de energía en una papilla de  
zanahoria.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A:**

**CARLOS ALEJANDRO VILLA CASIMIRO**

**ASESOR:**

**I.A. FRANCISCO JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ**

**CO-ASESOR:**

**M.C. JULIETA GONZÁLEZ SÁNCHEZ**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**  
**SECRETARÍA GENERAL**  
**DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ**  
**DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN**  
**PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA**  
**Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales**  
**de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

**Simulación y validación de la transferencia de energía en una papilla de zanahoria**

Que presenta el pasante: **Carlos Alejandro Villa Casimiro**  
Con número de cuenta: **310054607** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de junio de 2019.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. María Elena Vargas Ugalde</u>	
<b>VOCAL</b>	<u>Dr. Ricardo Paramont Hernández García</u>	
<b>SECRETARIO</b>	<u>I.A. Francisco Javier López Martínez</u>	
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>I.Q.I Ada Josefa Meza Meza</u>	
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>I.A. Virginia López García</u>	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

Agradecimientos:

A la UNAM y FES Cuautitlán por formarme como una mejor persona y profesionista. Es un enorme orgullo y honor pertenecer a esta gran institución.

A mis padres, Francisco y Donají, por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida. Sin duda, no lo habría logrado sin sus consejos y soporte. Les debo absolutamente todo. Los amo infinitamente.

A mi hermano y mejor amigo David por esas interminables charlas en las que acababan en interesantes deducciones sobre nuestra forma de percibir esta realidad compartida. Sigamos juntos en el camino y lograremos lo que nos proponamos. Gracias por enseñarme tanto.

A mis más grandes e inseparables amigos, Saúl Sánchez y Carlos Zárate, por estar codo a codo durante esta etapa especial de mi vida, aconsejándonos mutuamente y compartiendo siempre las mismas inquietudes que nos surgían. Mi mejor equipo de trabajo. Aprendí tanto de ustedes, solo me queda más que agradecer por su sincera amistad sin pretensiones y sin esperar nunca nada a cambio.

A los profesores María Elena Vargas, Francisco López y Julieta González, por su compromiso, dedicación y tolerancia para resolver cualquier duda y atender cualquier comentario, no solo en el trabajo de tesis sino en las asignaturas que me impartieron durante la carrera. Les debo gran parte de mi formación como ingeniero.

*Este trabajo fue realizado con el apoyo del programa UNAM DGAPA PAPIME PE208917. Así mismo se agradece el apoyo financiero del proyecto FESC UNAM PIAPI 1850.*

## ÍNDICE

Resumen	1
Introducción	2
Capítulo 1. Antecedentes	4
1.1 Tratamientos térmicos en la conservación de alimentos	4
1.1.1 Pasteurización	4
1.1.2 Esterilización	6
1.2 Cinética de inactivación térmica	8
1.3 Requerimientos de letalidad para pasteurización	10
1.4 Mecanismos de transferencia de calor en los procesos térmicos	11
1.4.1 Conducción de calor en estado no estacionario	12
1.4.2 Transferencia de calor por convección libre	14
1.5 La radiación electromagnética	15
1.5.1 Las microondas	16
1.5.2 Efecto de las microondas sobre los alimentos	18
1.6 Aplicaciones de la pasteurización por microondas en alimentos	19
1.7 Simulación en los procesos térmicos de alimentos sólidos	20
1.8 Simulación de calentamiento por microondas	22
1.9 Modelamiento matemático en el calentamiento por microondas	24
1.10 Zanahoria	26
1.10.1 Vitamina a	27

Capítulo 2. Metodología	29
2.1 Objetivo	29
2.1.1 Objetivo particular 1	29
2.1.2 Objetivo particular 2	29
2.1.3 Objetivo particular 3	29
2.2 Materiales y métodos	30
2.2.1 Consideraciones para el desarrollo del modelo	30
2.2.2 Variables termofísicas del puré de zanahoria	33
2.3 Metodología para el desarrollo del modelo de simulación	34
2.4 Preparación de la muestra	58
2.5 Perfil de temperatura	59
2.6 Medición de exactitud del modelo	60
2.7 Integración de un modelo de inactivación microbiana	60
3. Resultados y discusión	62
3.1 Simulación del calentamiento por microondas	62
3.2 Validación de simulación	63
3.3 Comparación de los perfiles de temperatura	66
3.4 Integración de un modelo de inactivación microbiana	68
Conclusiones	71
Recomendaciones	72
Referencias	76

## RESUMEN.

El objetivo del estudio fue simular y validar los perfiles de temperatura dependientes del tiempo en una papilla de zanahoria por medio de un modelo integral que combina fenómenos electromagnéticos gobernados por la ley de Maxwell y de transferencia de calor por la ley de Fourier, para describir los fenómenos de transporte en juego durante el proceso, utilizando el método numérico de elementos finitos resuelto por el software comercial Comsol Multiphysics y para predecir el patrón de calor en un proceso de pasteurización del producto, basado en un modelo de inactivación microbiana,  $F_0$ , que permita establecer un producto seguro.

Se encontró que la simulación funciona bastante aceptablemente al centro de la muestra ya que la predicción de la distribución de la temperatura se aproxima a la medida experimental, donde el error de raíz cuadrada (RMSE) varía de 3.02 a 20.11° C.

Debido al calentamiento no uniforme inherente del proceso, la parte inferior de la papilla se detectó como el punto frío al que el valor encontrado de  $F_0$  fue de 8.97 minutos, lo que se requiere para reducir 6-log del patógeno vegetativo *Listeria monocytogenes*. Por lo que se establece que el producto ha logrado un grado de inocuidad para el consumo humano.

## INTRODUCCIÓN.

Los procesos térmicos son vitales en la industria alimentaria. Estos tipos de procesos están basados en el calentamiento externo a los alimentos por un periodo de tiempo a una elevada temperatura. Sin embargo, el tratamiento térmico puede causar una degradación indeseable en la calidad del producto y puede reducir el contenido o la disponibilidad de algunos compuestos bioactivos. Así, existe un desafío continuo en términos de desarrollo de procesamiento térmico avanzado para la industria alimentaria debido a la demanda de alimentos mejorados, tanto en seguridad como en calidad, es decir, producir productos libres de bacterias mientras conserven el sabor, olor, color y textura naturales. Por lo tanto, algunas tecnologías emergentes han sido probados en el procesamiento de alimentos tales como: altas presiones hidrostáticas, campos de pulsos eléctricos, ultrasonido, plasma en frío, campos oscilantes magnéticos, luz ultravioleta, radiación de microondas, irradiación, fase densa de dióxido de carbono y ondas de choque. En los últimos años, las microondas u ondas de radiofrecuencia han sido exploradas para su posible uso en el procesamiento de alimentos con resultados exitosos en inactivación microbiana. (Halkman & Yücel, 2014).

La destrucción de microorganismos o enzimas por microondas u ondas de radiofrecuencia a temperaturas letales se explica por una o más de las siguientes teorías: calentamiento selectivo, electroporación, ruptura de membrana celular y acoplamiento de campo magnético (Kozempel et al, 1998). Independientemente del origen exacto del efecto térmico, es evidente que las microondas son eficaces en la destrucción de microorganismos o inactivación de enzimas como lo demostraron Chandrasekaran y colaboradores en el 2013.

Sálazar González y colaboradores en 2012 reportan que, con el conocimiento de propiedades dieléctricas y las condiciones apropiadas para aplicar la energía de microondas, la letalidad del proceso puede ser eficiente. Mientras que estudios realizados por Lau y Tang (2002) establecieron que la pasteurización por microondas alcanzó la temperatura requerida para dicha pasteurización dos veces más rápida que el calentamiento convencional (30 min) en un estudio con



espárragos en escabeche. De igual manera, se observó que la degradación térmica del espárrago fue mayor cuando se sometió al tratamiento convencional en comparación que cuando se sometió a calentamiento por microondas.

Por otra parte, la simulación por computadora del calentamiento de alimentos por microondas ha sido una herramienta útil para entender los fenómenos que están ocurriendo en el proceso, ya que utilizan ecuaciones electromagnéticas y de transferencia de calor para calcular el campo de temperatura de alimentos calentados. En estudios realizados por Zhang & Datta en 2003 y Pitchai y colaboradores en 2012, estos modelos fueron resueltos iterativamente usando métodos numéricos como diferencias y elementos finitos.

Por lo tanto, en las últimas dos décadas la simulación por computadora se ha convertido en una herramienta para comprender la complejidad del calentamiento por microondas con la asistencia de técnicas computacionales eficientes y el desarrollo de métodos numéricos correctos. Una simulación por computadora del calentamiento de alimentos por microondas puede ayudar en optimizar el diseño de sistemas alimentarios y mejorar la calidad y seguridad de los empaques (Pitchai et al, 2014).

Por lo que en este trabajo se plantea simular los perfiles de energía en forma de calor generados por microondas, mediante el software comercial Comsol Multiphysics, para describir los fenómenos de electromagnetismo y transferencia de calor que ocurren en el proceso de pasteurización de una papilla de zanahoria y para obtener un producto seguro.

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

### 1.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS.

Los procesos térmicos tienen el objetivo básico de destruir microorganismos (bacterias y formas de vida que forman esporas) en los alimentos. La inhibición del crecimiento microbiano y la inactivación de toxinas microbianas también son necesarias. Otros factores (pH, presencia de moléculas grasas, calcio, etc.) son importantes. Como resultado, la elección del tratamiento térmico "correcto" (pasteurización, esterilización) y los parámetros del proceso relacionados (tiempo, temperatura) deben considerarse en diferentes casos (Montanari et al., 2018).

El procesamiento térmico es la respuesta tecnológica contra la resistencia de los agentes microbiológicos que pueden afectar a la salud y causar una degradación significativa de los alimentos. En realidad, la base del procesamiento térmico debería denominarse "termobacteriología". De hecho, la destrucción térmica (la estrategia tecnológica que es capaz de reducir y eliminar la actividad microbiana por el calor) no se puede aplicar de manera confiable sin un gran conocimiento de la resistencia térmica atribuida a los microorganismos (Pflug et al., 2001). Los resultados finales de los estudios de resistencia térmica son "curvas de supervivencia" logarítmicas (Peleg et al., 2005), estas representaciones matemáticas de los perfiles de evolución microbiana dependen de varios factores que pueden reducir, o mejorar, la destrucción térmica de microorganismos (actividad del agua, pH, etc.).

En general, los alimentos pueden someterse a tratamientos como la pasteurización y la esterilización en función de la naturaleza del producto contenido, la ecología microbiana relacionada, los requisitos de durabilidad prolongada (productos alimenticios estables en el anaquel) y ciertas características relacionadas con el empaque, como la transferencia de calor (Maurer & Ozen, 2004).

#### 1.1.1 PASTEURIZACIÓN.

La palabra "pasteurización" fue nombrada originalmente en honor al científico francés Louis Pasteur, quien inventó el proceso de calentamiento de líquidos como

el vino y cerveza a una temperatura relativamente “suave” (alrededor de 55 ° C) por un corto tiempo para prevenir el deterioro (Silva et al., 2014) Este método de calentamiento rápido se conoció como pasteurización y luego se aplicó a la leche para eliminar microorganismos patógenos. Por lo tanto, la pasteurización tradicional se refiere al tratamiento térmico de alimentos (generalmente por debajo de 100 ° C) para destruir microorganismos de importancia para la salud pública. Los procesos de pasteurización utilizados en la industria no destruyen todos los microorganismos en los alimentos; solo se dirigen a los agentes patógenos pertinentes y reducen los organismos de deterioro que pueden crecer durante el almacenamiento y la distribución (Silva & Gibbs, 2012).

Hoy en día, la pasteurización ha sido ampliamente aceptada como un método de conservación eficaz para eliminar patógenos en productos alimenticios, con una pérdida mínima de la calidad deseada de los alimentos. Las nuevas tecnologías que pueden satisfacer los objetivos de la pasteurización han crecido rápidamente en los últimos años. El desarrollo de estas tecnologías emergentes exige una ampliación de la definición de pasteurización. Sin embargo, no parece haber una definición universalmente aceptada para la pasteurización. En los Estados Unidos, el Comité Asesor Nacional sobre Criterios Microbiológicos para Alimentos (NACMCF, por sus siglas en inglés) ha determinado los parámetros científicos necesarios para establecer métodos alternativos equivalentes de pasteurización, y definió la pasteurización como “Cualquier proceso, tratamiento o combinación de los mismos que se aplique a los alimentos para reducir los microorganismos más resistentes de importancia para la salud pública a un nivel que probablemente no suponga un riesgo para la salud pública en condiciones normales de distribución y almacenamiento” (NACMCF, 2006). Esta definición permite la aplicación de una amplia gama de tecnologías (una o en combinación) a diferentes alimentos para la pasteurización e incluye tecnologías térmicas (calentamiento de vapor y agua caliente, calentamiento ohmico, calentamiento por microondas, procesamiento por infrarrojos, etc.) y tecnologías no térmicas (procesamiento a alta presión, radiación ultravioleta, irradiación, campo eléctrico pulsado, tratamientos químicos,

ultrasonido, filtración, descarga de arco de alta tensión, etc.). Además del método de procesamiento, se deben incluir las siguientes consideraciones al desarrollar un proceso de pasteurización (Peng et al., 2017):

- 1) Determinar el microorganismo más resistente de preocupación para la salud pública que probablemente sobreviva a los procesos de pasteurización seleccionados.
- 2) Evaluar y validar el nivel requerido de inactivación del microorganismo objetivo, para asegurarse de que "no es probable que presente un riesgo para la salud pública".
- 3) Evaluar la distribución y la temperatura de almacenamiento adecuadas y la vida útil.
- 4) Considerar el impacto de la matriz alimentaria en la supervivencia del patógeno.
- 5) Definición del equipo específico y los parámetros operativos para el proceso de pasteurización propuesto.

### 1.1.2 ESTERILIZACIÓN.

La esterilización de alimentos es una operación básica a nivel industrial en la cual el alimento ya sea sólido o líquido se calienta a una temperatura superior a 100 °C durante suficiente tiempo con el objetivo de eliminar la actividad microbiana y enzimática, asegurando la estabilidad del producto (Richardson, 2001). En productos envasados a nivel de ingeniería la esterilización puede considerarse como un proceso térmico en el cual interviene un medio calefactor y un medio a calentar. En este proceso intervienen los diferentes mecanismos de transferencia de calor que sumados a la heterogeneidad del producto hacen que dicho proceso sea complejo cuando se pretende predecir su comportamiento (Lewis et al., 2000).

La esterilización térmica se ha utilizado para lograr una vida de anaquel estable a largo plazo de alimentos enlatados y ahora se utiliza para una amplia gama de

productos. La mayoría de los alimentos estables se procesan térmicamente después de colocarlos en los contenedores finales (Heldman & Hartel, 1997).

El objetivo de la esterilización térmica es producir alimentos seguros y de alta calidad a un precio que el consumidor esté dispuesto a pagar. Es una función de varios factores, como la velocidad de calentamiento del producto, el coeficiente de transferencia de calor de la superficie, la temperatura inicial del alimento, el tiempo de calentamiento del medio de calentamiento, el valor  $Z$  para el factor de calidad y el valor objetivo de  $F_0$  de referencia (Silva et al., 1992). El proceso de esterilización no solo prolonga la vida útil de los alimentos, sino que también afecta su calidad nutricional, como el contenido de vitaminas. La esterilización térmica óptima de los alimentos siempre requiere un compromiso entre las influencias benéficas y destructivas del calor en los alimentos. Uno de los desafíos para la industria de enlatado de alimentos es minimizar estas pérdidas de calidad, al tiempo que proporciona un proceso adecuado para lograr el grado deseado de esterilidad. La optimización de tal proceso es posible debido a la fuerte dependencia de la inactivación de las bacterias con respecto a la temperatura en comparación con la tasa de destrucción de la calidad (Lund, 1977). Por este motivo, se requiere una estimación de la tasa de transferencia de calor para obtener las mejores condiciones de procesamiento y maximizar la calidad del producto.

La esterilización térmica es uno de los medios más eficaces para conservar una gran parte de nuestro suministro de alimentos. Un esterilizador es una unidad en la que los alimentos se calientan y se mantienen a una alta temperatura durante un período suficiente para eliminar los microorganismos susceptibles en el producto alimenticio. Un producto estéril es aquel en el que no hay microorganismos viables. Un organismo viable es aquel que puede reproducirse cuando se expone a condiciones óptimas para su crecimiento. La temperatura ligeramente superior a la máxima para evitar el crecimiento bacteriano provoca la muerte de las células bacterianas vegetativas, mientras que las esporas bacterianas pueden sobrevivir a temperaturas mucho más altas. Dado que las esporas bacterianas son mucho más

resistentes al calor que las células vegetativas, son una preocupación primordial en la mayoría de los procesos de esterilización. El vapor saturado es el medio de calefacción más comúnmente utilizado y es altamente deseable para la esterilización comercial de alimentos enlatados ya que, durante el período de calentamiento, el vapor se condensa en la superficie del paquete, lo que da como resultado valores muy altos del coeficiente de transferencia de calor de la superficie (h). El enlatado convencional consiste en las siguientes operaciones (Al-Baali & Mohammed, 2006):

1. Preparación de los alimentos (limpieza, corte, clasificación, escaldado, etc.)
2. Llenar el recipiente.
3. Sellar el recipiente.
4. Colocar el recipiente en un lote o en una retorta continua donde se calienta durante un tiempo suficiente para la esterilidad comercial.
5. Enfriamiento del recipiente, que generalmente se realiza con una ducha fría.

## 1.2 CINÉTICA DE INACTIVACIÓN TÉRMICA.

En general, la disminución de microorganismos vivos en condiciones drásticas se puede expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$\log N = \log N_0 - K \times t \quad (1)$$

donde N es el número de microorganismos vivos después de un tratamiento térmico específico para una supuesta temperatura letal,  $N_0$  corresponde al número inicial de microorganismos vivos antes del tratamiento, K es una constante (velocidad de inactivación) para este tratamiento y t significa el tiempo de tratamiento. La cinética de inactivación térmica de microorganismos se obtiene estableciendo primero una curva de supervivencia, que es una curva logarítmica del número de microorganismos que sobreviven a un determinado tratamiento a una temperatura dada frente al tiempo de calentamiento. Esta supone que la destrucción microbiana generalmente sigue una reacción de primer orden. Dos parámetros clave: valores D y z se determinan a partir de las curvas de supervivencia y resistencia,

respectivamente. El valor  $D_t$ , llamado factor de reducción decimal representa la resistencia térmica para un microorganismo específico y una temperatura letal; así que depende solo del tiempo y corresponde al intervalo temporal necesario para inactivar el 90% de los microorganismos vivos iniciales. En consecuencia, cuanto mayor sea este número, mayor será la resistencia térmica para un microorganismo en específico (Casolari, 1996). Las curvas de supervivencia pueden representarse mediante ecuaciones no lineales: este comportamiento se observa principalmente en relación con las células vegetativas, mientras que las esporas parecen ser más "regulares" según este punto de vista (Larousse y Brown, 1997). Dicho valor se calcula como sigue:

$$D_t = \frac{1}{k_t} = \frac{t_2 - t_1}{\log(N_1) - \log(N_2)} \quad (2)$$

Donde  $N_1$  y  $N_2$  representa la cuenta sobreviviente seguido por los tiempos de calentamiento  $t_1$  y  $t_2$  en minutos. La constante de velocidad de primer orden ( $k_t$ ) se obtiene de la expresión  $k_t = 2.303/D$ . Esta constante se usa para describir el cambio en la concentración de un reactivo en función del tiempo. En poblaciones microbianas, el valor de  $D_T$  se usa para describir la misma relación. De ello se deduce que la relación entre la constante de velocidad de reacción ( $k_t$ ) y el tiempo de reducción decimal ( $D_T$ ) viene dada por expresión (2).

Además,  $D_t$  depende de la temperatura para un microorganismo específico. Desde el punto de vista matemático, la ecuación 3 muestra la relación entre los valores  $D_{T_2}$  y  $D_{T_1}$  y  $T_1$  y  $T_2$  correlacionados: La sensibilidad a la temperatura (valor Z) que representa el cambio de temperatura que da como resultado un cambio de 10 veces en el valor de  $D_t$ . Está representado matemáticamente como sigue:

$$Z = \frac{T_2 - T_1}{\log(D_{T_1}) - \log(D_{T_2})} \quad (3)$$

donde  $z$  corresponde a la pendiente de la ecuación lineal obtenida con la representación de los valores de  $D_t$  (variable dependiente, eje Y) como logaritmos contra los valores de  $T$  (eje X). La figura 1 lo muestra gráficamente:

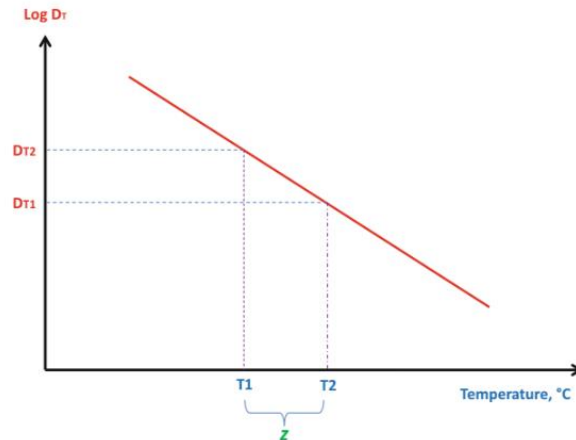


Figura 1.  $D_t$  en función de los valores térmicos para un microorganismo específico. La ecuación 3 muestra la relación entre los valores  $D_{t2}$  y  $D_{t1}$  en un lado y los valores correlacionados  $T_1$  y  $T_2$ .  $Z$  corresponde a la pendiente de la ecuación lineal obtenida con la representación de los valores de  $D_T$  (variable dependiente, eje Y) como logaritmos contra los valores de  $T$  (eje X) (Montanari et al., 2018)

Como resultado, se pueden obtener  $D_t$ ,  $z$  y la estrategia para el tratamiento térmico para un microorganismo y alimento específico.

### 1.3 REQUERIMIENTOS DE LETALIDAD PARA PASTEURIZACIÓN.

Tradicionalmente los datos cinéticos estimados (usando la ecuación clásica de primer orden) están vinculados a las historias térmicas tiempo-temperatura con la finalidad de pre-definir el punto frío del dentro del producto para evaluar la “letalidad del proceso” ( $F_0$ ), el cuál constituye la base para un procesamiento térmico correcto (Hayakawa, 1997).

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{(T-T_0)}{z}} dt \quad (4)$$



Donde  $t$  representa el tiempo (min),  $z$  es la sensibilidad a la temperatura del microorganismo a tratar,  $T$  es la temperatura a cualquier tiempo dado y  $T_0$  es la temperatura de referencia del proceso ( $^{\circ}\text{C}$ ).

La letalidad requerida se efectúa sobre el organismo de interés para la salud pública. Por ejemplo, la pasteurización de la leche se basa en reducciones del ciclo 12D en los números de *Coxiella burnetti* (Harper, 1976), mientras que el huevo entero es tratado térmicamente para proporcionar una reducción del ciclo 9D basada en *Salmonella seftenberg* (Hammid-Samini & Swartzel, 1984).

Se emplean diferentes combinaciones tiempo-temperatura, y obviamente diferentes métodos de procesamiento, sistemas o técnicas para lograr la letalidad requerida. Tales sistemas y las historias de tiempo-temperatura afectarían la calidad final del producto a diferentes niveles. Por lo tanto, los cambios mínimos sensoriales y organolépticos de los productos alimenticios se clasifican a través de rutinas de optimización de procesos para determinar el sistema adecuado, utilizando datos cinéticos para el nutrimento más sensible al calor. La historia tiempo-temperatura de un producto que se trata bajo un proceso térmico dependerá de varios factores: (i) el sistema de procesamiento (convencional o aséptico), (ii) el medio de calentamiento (vapor, inmersión en agua, agua o mezclas de vapor/aire), (iii) características del producto incluyendo la consistencia, la relación sólido/líquido y la relación termofísica (iv) temperatura inicial del producto y medio de calentamiento (v) tipo de contenedor, forma y tamaño (Awuah et al., 2007).

#### 1.4 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS PROCESOS TÉRMICOS.

La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede transferirse, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia (Holman, 1998).

La conducción es el movimiento de calor por transferencia directa de energía molecular dentro de los sólidos. La convección libre es la transferencia de calor en

el fluido por grupos de moléculas o volumen de fluido que se mueve como resultado de las diferencias en la densidad del fluido. En la mayoría de las aplicaciones, estos dos tipos de transferencia de calor ocurren simultáneamente, pero un tipo puede ser más importante que el otro. La transferencia de calor en estado estacionario tiene lugar cuando no hay cambios en la temperatura con el tiempo. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de procesamiento de alimentos, la temperatura del alimento o del medio de calentamiento o enfriamiento cambia constantemente, y la transferencia de calor en un estado inestable se encuentra con mayor frecuencia. Los cálculos de la transferencia de calor en estas condiciones son complicados, pero se simplifican al hacer varias suposiciones (Fellows, 1996). La transferencia de calor por radiación térmica no desempeña un papel importante en la transferencia de calor en los procesos térmicos, ya que la temperatura de calentamiento no supera los 121 °C.

#### 1.4.1 CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO.

En el procesamiento de alimentos, hay muchas situaciones donde la temperatura es una función del tiempo. Los ejemplos más notables de transferencia de calor en estado no estacionario son el calentamiento y enfriamiento de materiales particulares, como el enfriamiento y calentamiento de productos en contenedores (enlatado). Si los materiales calentados o enfriados son sólidos, entonces el calor se transferirá solo por conducción. Los cálculos de la transferencia de calor en estado inestable suelen ser complicados e implican resolver la ecuación de Fourier, escrita en términos de la ecuación diferencial parcial en tres dimensiones (Karel et al., 1975). En la transferencia de calor en estado no estacionario o inestable la temperatura dentro de un alimento durante el procesamiento depende del tiempo y la posición. Los cambios de temperatura están influenciados por:

- 1) Las temperaturas iniciales del cuerpo calentado.
- 2) La temperatura del medio de calentamiento.
- 3) El coeficiente de transferencia de calor de la superficie (coeficiente de transferencia de calor en todas las interfaces, así como en el caso de convección)

- 4) La conductividad térmica, el calor específico y la densidad del alimento y su variación con la temperatura y la composición.
- 5) Espesor del cuerpo calentado

La ecuación básica para la conducción de calor en estado inestable en una dimensión de un espacio ( $x$ ) es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (5)$$

donde  $\partial T / \partial t$  es el cambio de temperatura con el tiempo, y  $k$  es la conductividad térmica ( $W m^{-1}K^{-1}$ ),  $\rho$  es la densidad ( $kg m^{-3}$ ) y  $C_p$  es el calor específico ( $J kg^{-1}K^{-1}$ ).

Cuando un alimento sólido se calienta o se enfría con un fluido, la resistencia a la transferencia de calor se controla principalmente por el coeficiente de transferencia de calor de la superficie ( $h$ ) y la conductividad térmica del alimento ( $k$ ). Estos dos factores están relacionados por el número de Biot ( $Bi$ ):

$$Bi = \frac{h\delta}{k} \quad (6)$$

Donde  $\delta$  es la dimensión característica o la longitud de la trayectoria de transferencia de calor en el sólido (m). Con valores de  $Bi$  pequeños ( $< 0.1$ ), la película superficial es la principal resistencia al flujo de calor; en este caso, se supone una resistencia de transferencia de calor interna (de conducción) despreciable en el alimento sólido, es decir, la conducción de calor dentro del cuerpo es mucho más rápida que la convección del medio en la superficie de éste. (Barbosa-Canovas et al., 1997). Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones, la conductividad térmica del alimento limita la velocidad de transferencia de calor ( $Bi > 40$ ). Los cálculos en estos casos son complejos, y hay una serie de tablas disponibles para resolver las ecuaciones de estado inestable para alimentos de forma simple.

#### 1.4.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN LIBRE.

Cuando la temperatura de un fluido cambia, los cambios resultantes en la densidad establecen corrientes de convección naturales, que se producen como resultado del movimiento masivo del fluido. Obviamente, la transferencia de calor por conducción ocurre simultáneamente, pero en general es despreciable en comparación con la transferencia de calor por convección (Karel et al., 1975). La tasa de transferencia de calor por convección se rige por la ley de enfriamiento de Newton. Esta ley establece que la velocidad de transferencia de calor por convección es directamente proporcional al área de transferencia de calor y la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie de calentamiento/enfriamiento:

$$Q = h_s a (T_{bu} - T_s) \quad (7)$$

donde  $Q$  es la tasa de transferencia de calor (W),  $a$  es el área de la superficie ( $m^2$ ),  $T_s$  es la temperatura de la superficie,  $T_{bu}$  es la temperatura del fluido y  $h_s$  es el coeficiente de transferencia de calor de la superficie o la película ( $W m^{-2} K^{-1}$ ). El coeficiente de transferencia de calor de la superficie está inversamente relacionado con la resistencia al flujo de calor, causada por la película límite cerca de la superficie, y por lo tanto es equivalente al término  $k / \Delta x$  en la ecuación de conducción. El coeficiente de transferencia de calor es una función de las propiedades físicas del alimento líquido utilizado en el procesamiento térmico, como la densidad, la viscosidad, el calor específico y el coeficiente de dilatación térmica. También está relacionado con la gravedad, que causa la circulación debido a los cambios en la densidad; la diferencia de temperatura y la longitud o el diámetro del contenedor bajo estudio. Las ecuaciones que relacionan estos factores se expresan como números adimensionales, como se muestra a continuación:

$$\text{Número de Nusselt } Nu = \frac{hd_v}{k} \quad (8)$$

$$\text{Número de Prandtl } Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (9)$$

$$\text{Número de Grashof } Gr = \frac{d_v^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (10)$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor en la interfaz líquido-sólido ( $W m^{-2} K^{-1}$ );  $d_v$  es la dimensión característica (m), que puede ser la altura o el diámetro del recipiente;  $k$  es la conductividad térmica del fluido ( $W m^{-1} K^{-1}$ );  $\rho$  es la densidad ( $kg m^{-3}$ );  $C_p$  es la capacidad calorífica específica ( $J kg^{-1}K^{-1}$ );  $\mu$  es la viscosidad ( $N s m^{-2}$ );  $g$  es la aceleración debida a la gravedad ( $m s^{-2}$ );  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica ( $K^{-1}$ ); y  $T$  es la diferencia de temperatura ( $^{\circ}C$ ) (Al-Baali & Mohammed, 2006).

Hay muchos números de correlaciones empíricas disponibles en la literatura que describen la relación entre Nu, Gr y Pr para muchos casos (Holman, 1998). Estos casos incluyen fluido calentado o enfriado por cilindros sólidos verticales y horizontales, superficies inclinadas, etc. Estas correlaciones son aproximadas y puramente empíricas y se pueden usar solo para las geometrías para las cuales se han desarrollado.

### 1.5 LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

El electromagnetismo, es una forma de radiación o emisión de ondas de energía producidas por la oscilación, aceleración o vibración de cargas eléctricas generadas por la atracción y repulsión entre electrones y protones.

Las emisiones de radiación electromagnética se hallan en todo el universo, y lo constituyen los rayos cósmicos provenientes de las galaxias, los rayos gamma, rayos X, ultravioleta, la luz visible, infrarrojos, microondas, las ondas radioeléctricas que utilizan la radio y la TV, las señales de nuestro control remoto así como los impresionantes colores del arcoíris, todas estas son una forma de radiación de ondas electromagnéticas cada una con diferentes velocidades de frecuencias, longitudes y energías (López, 2015)

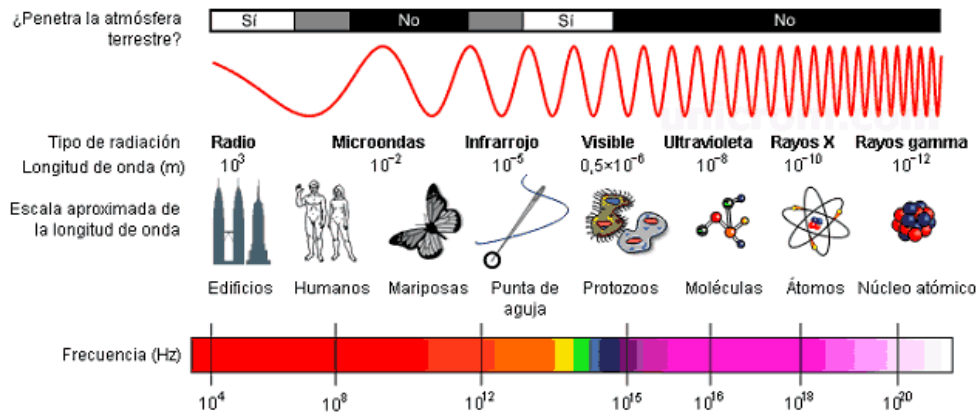


Figura 2. El espectro electromagnético lo forman distintas clases de ondas que van desde las que poseen longitudes infinitesimalmente pequeñas como los rayos Gamma, hasta las extraordinariamente largas como las ondas de radio (López, 2015).

La radiación electromagnética fue primeramente predicha con las ecuaciones de Maxwell en 1864 y su existencia fue demostrada por Heinrich Hertz en 1888. Durante la segunda Guerra Mundial, la tecnología de microondas se usó en las telecomunicaciones de radar.

### 1.5.1 LAS MICROONDAS.

Radiación por microondas, en el rango de espectro electromagnético va desde los 300 MHz hasta los 300 GHz. Las microondas consisten en un componente de campo eléctrico y magnético. Las microondas viajan en la materia de la misma forma como las ondas de luz: son reflejadas por metales, absorbidas por algunos materiales dieléctricos y transmitidos sin pérdidas significativas a través de otros materiales. Las microondas son una forma de energía electromagnética (EME), donde la energía aplicada es convertida en calor por la mutua interacción entre los medios (el campo eléctrico de la onda con partículas cargadas en el material). Por ejemplo, agua, carbón, alimentos con alto contenido de agua y algunos solventes orgánicos son buenos absorbentes de microondas; mientras que la cerámica, vidrio de cuarzo y muchos materiales termoplásticos solamente absorben ligeramente las microondas. (Halkman & Yücel, 2014). El agua en el alimento es la principal responsable del calentamiento dieléctrico. Debido a su naturaleza dipolar, las moléculas de agua tratan de acoplarse y seguir al campo electromagnético asociado con la radiación electromagnética conforme oscila a frecuencias muy altas. Estas

oscilaciones de las moléculas de agua producen calor. El segundo mecanismo de calentamiento es a través de la migración oscilatoria de iones en el alimento que genera calor bajo la influencia del campo eléctrico oscilatorio (Datta & Davidson, 2003)

El primer horno de microondas fue desarrollado por compañía Raytheon de Norte América en 1951, demostrando el potencial de la aplicación de las microondas para suministrar energía de calentamiento rápida y eficientemente. En la década de los 70's, el generador de microondas fue revolucionado por los japoneses dentro de un horno doméstico de microondas (simple, seguro y un magnetrón barato) para ser usado en el procesamiento de alimentos. (Halkman & Yücel, 2014).

Aunque son varios los componentes de un horno de MO (Figura 3), la operación de calentamiento se basa en tres de ellos (Schlegel, 1992):

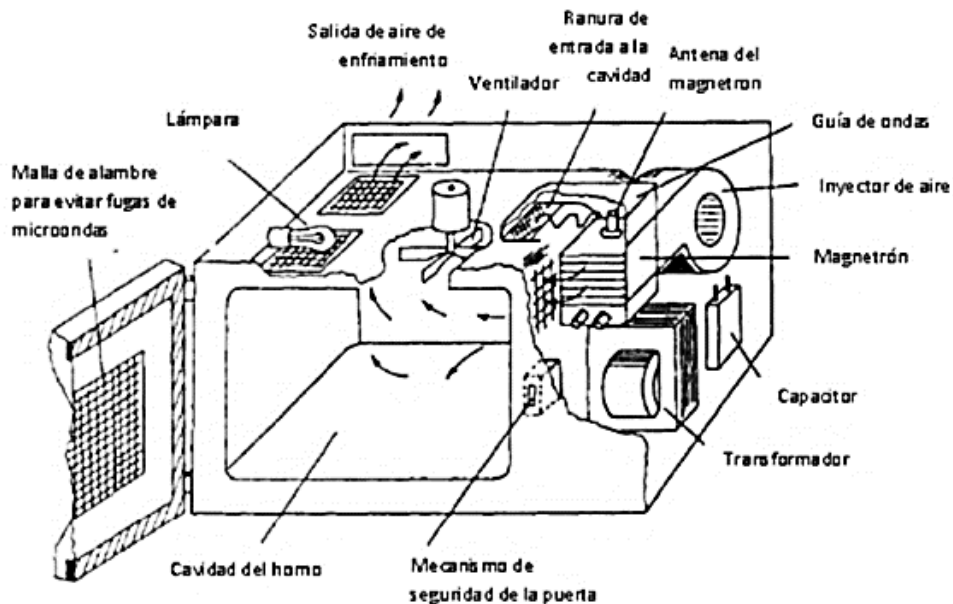


Figura 3. Elementos de un horno de microondas doméstico (Michael et al., 1997)

**Magnetron.** Es la unidad que convierte la energía eléctrica en energía de MO de alta frecuencia, es un diodo termoiónico que posee un ánodo y un cátodo calentado directamente (Figura 4) (Michael et al., 1997). En sistemas industriales, está

acoplado a una computadora y se ajusta individualmente para cumplir con los requerimientos del producto.

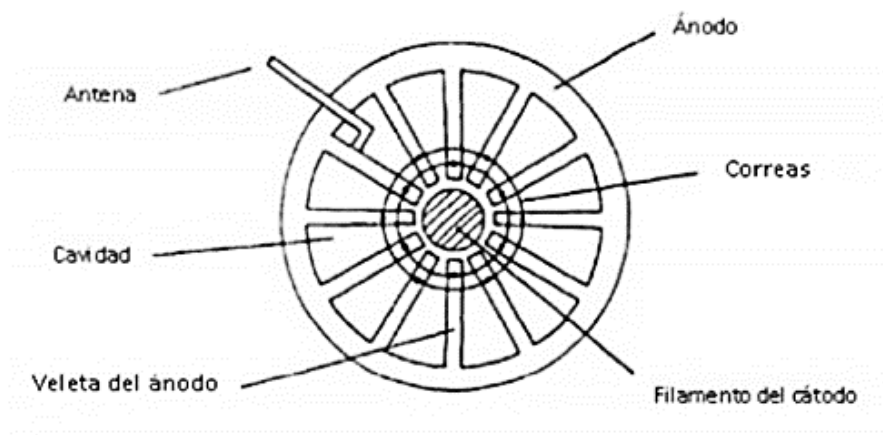


Figura 4. Ilustración esquemática de un magnetrón (Michael et al., 1997).

**Sistema guiador de ondas.** Es un acoplador y sintonizador direccional que guía la energía de MO al punto de aplicación. Al enfocar la energía directamente a un área pequeña se garantiza un óptimo en la eficiencia, así como una larga vida del magnetrón (Cano, 2008).

**Cámara de tratamiento.** El alimento es expuesto a las MO dentro de la cámara, un espacio cerrado cuyo centro se encuentra acoplado al sistema guiador de ondas y que se encuentra aislado (Cano, 2008).

#### 1.5.2 EFECTO DE LAS MICROONDAS SOBRE LOS ALIMENTOS.

El efecto de la radiación de microondas en la destrucción de microorganismos es tanto térmico como no térmico. Por lo general se acepta que la destrucción de microorganismos se debe principalmente a la exposición al proceso, por lo que no hay duda sobre la validez del efecto térmico. Sin embargo, actualmente, se sabe muy poco acerca de los mecanismos que intervienen en los efectos no térmicos que implican la transferencia de energía del campo electromagnético directamente a los modos vibratorios de las macromoléculas y alterando su configuración. Varias publicaciones sugieren que la radiación de microondas puede tener efectos no térmicos, mientras que estudios otros han encontrado que las microondas exclusivamente inactivan microorganismos por calor.



El calentamiento por microondas utiliza algunas características del producto (conductividad eléctrica, contenido de agua y propiedades dieléctricas) para garantizar un calentamiento rápido y directo mediante la generación de calor en el producto. El aumento de temperatura en el producto durante el calentamiento por microondas es el resultado de la generación interna de calor debido a la absorción de energía eléctrica del campo, que se basa en la fricción intermolecular que surge entre la conducción iónica y la rotación dipolar. El calor generado posteriormente se distribuye a lo largo del producto por conducción y convección. (Hankman & Yücel, 2014).

#### 1.6 APLICACIONES DE LA PASTEURIZACIÓN POR MICROONDAS EN ALIMENTOS.

La destrucción de microorganismos o enzimas por microondas u ondas de radiofrecuencia a temperaturas subletales se explica por una o más de las siguientes teorías: calentamiento selectivo, electroporación, ruptura de membrana celular y acoplamiento de campo magnético (Kozempel et al., 1998). La teoría del calentamiento selectivo sugiere que los microorganismos se calientan selectivamente debido a las microondas y alcanzan una temperatura superior a la del fluido circundante. Este efecto hace que los microorganismos sean destruidos rápidamente. De acuerdo con la teoría de la electroporación, el potencial eléctrico a través de la membrana celular causa poros, lo que da lugar a la fuga de materiales vitales para el microorganismo. En la teoría de ruptura de la membrana celular, ésta se rompe debido al voltaje aplicado al material. Independientemente del origen exacto de la mejora del efecto térmico, es evidente que las microondas son eficaces en la destrucción de microorganismos o inactivación de enzimas (Chandrasekaran et al., 2013)

La aplicación de pasteurización por microondas ha sido ampliamente empleada en alimentos fluidos tales como la pasteurización de jugos frescos y esterilización de leche. Fueron analizados la inactivación microbiana y enzimática de varios

alimentos fluidos tales como jugo de manzana, sidra de manzana, agua de coco, jugo de uva y leche. Se ha reportado que, con el conocimiento de propiedades dieléctricas y las condiciones apropiadas para aplicar la energía de microondas, la letalidad del proceso puede ser eficiente (Salazar-González et al., 2012).

Dev y colaboradores (2008) estudiaron que la pasteurización del huevo en cáscara puede lograrse con la ayuda de microondas. Se sabía que la albúmina tenía propiedades dieléctricas más altas que la yema. Por el contrario, el calentamiento en microondas del huevo en cáscara no mostró ninguna diferencia significativa en la velocidad de calentamiento de la albúmina y la yema. La calefacción interior mejorada puede deberse a la combinación de la geometría del huevo, enlaces y tamaño del huevo. Se demostró que la pasteurización por microondas de los huevos con cáscara puede lograrse sin perder la integridad de los huevos. En otro estudio, la pasteurización por microondas se utilizó para la inactivación de *Salmonella typhimurium* en la yema de huevos de cáscara (Shenga, et al., 2010). Una reducción del 22% de microbios se alcanzó con la irradiación de microondas de 15 segundos mientras que el 36% de reducción se logró por tratamiento térmico húmedo en 15 min (Shenga et al., 2010). Mientras que estudios realizados por Lau y Tang (2002) establecieron que la pasteurización por microondas de espárragos en escabeche alcanzó la temperatura requerida para la pasteurización dos veces más rápida que el calentamiento convencional (30 min). La degradación térmica del espárrago fue mayor cuando se sometió al tratamiento convencional en comparación a cuando se sometió a calentamiento por microondas.

## 1.7 SIMULACIÓN EN LOS PROCESOS TÉRMICOS DE ALIMENTOS SÓLIDOS.

En el diseño de las operaciones de proceso de alimentos térmicos, se debe conocer la temperatura en la zona de calentamiento más lenta (ZCL) y el centro térmico de los alimentos durante el proceso. Tradicionalmente esta temperatura se mide utilizando termopares. La utilización de termopares para registrar la temperatura en varias posiciones en un recipiente durante el calentamiento perturba los patrones

de flujo, causando errores en las mediciones (Stoforos & Merson, 1990). Además, es difícil medir la temperatura en la ZCL porque se trata de una región no estacionaria, que se mantiene en movimiento durante el progreso del calentamiento, como se mostrará en el análisis de resultados del presente trabajo. Por esta razón, existe un interés creciente en el uso de modelos matemáticos para predecir la temperatura del alimento durante el tratamiento térmico (Datta & Teixeira, 1987). Los modelos matemáticos para la predicción de la temperatura durante la esterilización y pasteurización por calor son herramientas invaluable para ayudar a garantizar una producción y un control más seguros de los alimentos procesados térmicamente. Con el desarrollo de las computadoras de escritorio, estos modelos se desarrollaron rápidamente y la facilidad para resolver una serie compleja de ecuaciones hizo que fueran factibles el proceso y el monitoreo en línea (Tucker, 1991).

Los alimentos como el atún enlatado, los jarabes espesos, los purés y los concentrados generalmente se suponen que se calientan por conducción pura. Para estos alimentos, el tiempo de procesamiento requerido generalmente se determina mediante soluciones analíticas o numéricas a la ecuación de conducción de calor (Datta y Manson, 1986). Por ejemplo, Dincer et al. (1993) analizaron la transferencia de calor por conducción transitoria de alimentos enlatados durante la esterilización para determinar la tasa de transferencia de calor. Su modelo se basó en resolver la ecuación de conducción utilizando la condición de contorno del primer tipo en el modo de calor transitorio, que expresa una relación simple entre el tiempo y las temperaturas. Lanoiselle et al. (1986) desarrollaron un modelo lineal recursivo para representar la transferencia de calor dentro de una lata durante la esterilización en una retorta y predijeron la distribución de la temperatura interna en los alimentos enlatados durante el procesamiento térmico. Akterian (1994) desarrolló un modelo numérico para la determinación del campo de temperatura en estado inestable en alimentos enlatados calentados por conducción de varias formas y condiciones de contorno. La ecuación de conducción de calor se resuelve utilizando diferencias finitas. Silva et al. (1992) estudiaron las temperaturas de esterilización óptimas para

los alimentos calentados por conducción, considerando los coeficientes de transferencia de calor de superficie finitos. Se consideraron diferentes formas de transferencia de calor unidimensionales, y se encontró que la temperatura inicial y el tiempo de calentamiento del medio de calentamiento tuvieron poca influencia en la temperatura de procesamiento óptima. Banga et al. (1993) también estudiaron el procesamiento térmico de alimentos enlatados calentados por conducción. Las simulaciones numéricas se realizaron utilizando el método de diferencias finitas (MDF) y el método de elementos finitos (MEF). Los resultados de la simulación se validaron con algunos datos experimentales disponibles para la esterilización del atún enlatado.

### 1.8 SIMULACIÓN DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.

La disipación de calor por microondas localizada en los alimentos se difunde por conducción (Basak & Ayappa, 1997). La situación dinámica física causa cambios rápidos en las propiedades del material resultando en una solución computacional no lineal. Por lo tanto, el problema no lineal de calentamiento por microondas necesita resolverse acoplando ecuaciones electromagnéticas y de transferencia de calor.

Zhang & Datta (2003) y Pitchai et al. (2012) reportaron simulaciones computacionales que acoplan ecuaciones electromagnéticas y de transferencia de calor para calcular el campo de temperatura de alimentos calentados por microondas han sido reportados por. Estos modelos se resuelven iterativamente usando métodos numéricos como diferencias y elementos finitos.

En el modelado de la transferencia de calor durante el calentamiento con microondas se debe considerar en forma especial la interacción de la energía electromagnética con el alimento. El comportamiento de los campos eléctrico y magnético dentro de un horno de microondas (MO) es muy complejo. Las ecuaciones de Maxwell describen su distribución en el interior de los hornos MO, vacíos o cargados (Verboven et al., 2003). En la actualidad, se han seguido dos

líneas de modelado han sido seguidas para predecir la distribución de la energía electromagnética dentro del alimento: resolver las ecuaciones de Maxwell (Dinčov et al., 2004) o el uso de una descripción aproximada, la Ley de Lambert, que considera un decaimiento exponencial de la energía dentro del alimento (Tong y Lund, 1993; Ni y Datta, 2002).

Con el fin de modelar matemáticamente el proceso de calentamiento por microondas es necesario plantear y resolver el balance microscópico de energía, el cual junto con las condiciones de contorno conforman ecuaciones diferenciales no lineales. Para la resolución matemática de la transferencia de calor en estado transitorio existen diferentes métodos numéricos, los cuales presentan ciertas ventajas y desventajas dependiendo de las características del problema en estudio. El método usado en este trabajo es el de diferencias finitas (MDF) (Constantinides y Mostoufi, 1999)

Con el fin de facilitar la implementación del MDF han sido desarrollados ciertos programas comerciales, tales como COMSOL Multiphysics. Estos programas comerciales presentan las ventajas de disponer de módulos preconfigurados que permiten un rápido planteo y resolución numérica; sin embargo, no se adaptan fácilmente a condiciones particulares de procesamiento (Arballo et al., 2013)

COMSOL es un entorno de simulación, diseñado con aplicaciones del mundo real en mente. El punto de toda simulación es, por supuesto, imitar tan cerca como sea posible los efectos de los fenómenos, que son observados en la realidad ya sea en un contexto ingenieril o científico. Para hacer esto posible, existe la necesidad de la multifísica, que son múltiples modelos científicos que incluyen temas de diversos fenómenos que se presentan en el mundo real como lo son: acústica, electromagnetismo, reacciones químicas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos y transferencia de calor. COMSOL busca ofrecer y lo hace en una interfaz fácil de usar, orientada a hacer que los científicos e ingenieros sean más productivos en su trabajo diario. Gracias a este software los ingenieros están diseñando mejores productos más rápido a un menor costo, los científicos están explorando nuevos

descubrimientos, físicos están investigando tratamientos médicos innovadores, los educadores están conectando con sus estudiantes y la lista va aún más allá (Andrew, 2013).

## 1.9 MODELAMIENTO MATEMÁTICO EN EL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.

Las ecuaciones que gobiernan para acoplar el calor y la transferencia de masa al electromagnetismo comienzan a partir de la ecuación de continuidad, la ecuación de energía térmica y la ley de Fick. Despreciando la transferencia de masa, una ecuación general para la transferencia de calor puede describirse como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) = -\nabla q_R + Q_{em} \quad (11)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $C_p$  la capacidad calorífica específica,  $\lambda$  la conductividad térmica de los materiales utilizados en el problema,  $q_R$  la densidad de flujo de potencia de radiación y  $Q_{em}$  la fuente de calor generada por las microondas disipadas. El lado izquierdo de esta ecuación es bien conocido a partir de la ecuación tradicional de conducción de calor, los términos en el lado derecho se agregaron para la transferencia de calor por radiación y para la fuente de calor por las pérdidas dieléctricas, respectivamente (Metaxas, 1996).

Suponiendo que el producto se compone de un material sólido húmedo, solo se debe tener en cuenta el término de radiación en las superficies de los materiales gaseosos que producen condiciones de contorno adicionales y la ecuación (11) se puede simplificar para:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) = Q_{em} \quad (12)$$

La transferencia de calor y las ecuaciones electromagnéticas están acopladas explícitamente por los valores de la temperatura y la generación de calor electromagnético e implícitamente por la dependencia de la temperatura de las propiedades del material termo-físico. En la superficie del producto, las condiciones de contorno deben tener en cuenta la transferencia de calor externa.

Las microondas, siendo ondas electromagnéticas, se describen por las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (16)$$

Las ecuaciones de Maxwell describen la teoría acoplada de los fenómenos eléctricos y magnéticos descritos anteriormente. Las ecuaciones (13) y (14) describen la fuente  $\rho$  de un campo eléctrico  $E$  sin un monopolo magnético como fuente del campo magnético  $H$ . Las ecuaciones (15) y (16) muestran el acoplamiento entre los campos magnéticos y eléctricos.

La interacción del electromagnetismo con la materia se expresa por las relaciones constitutivas las ecuaciones (17) a (19), donde la permitividad o constante dieléctrica  $\epsilon$  (la interacción de materia no conductora con un campo eléctrico), la conductividad  $\sigma$  y la permeabilidad  $\mu$  (la interacción con un campo magnético) parecen modelar su comportamiento. Los valores de subíndice cero describen el comportamiento en vacío, de manera que  $\epsilon$  y  $\mu$  son valores relativos.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_T \cdot \vec{E} \quad (17)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_T \cdot \vec{H} \quad (18)$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (19)$$

En general, los materiales pueden ser tensores complejos (con comportamiento direccional-dependiente). En el caso de alimentos, algunas simplificaciones pueden ser posibles: desde el comportamiento no magnético de los alimentos, la permeabilidad puede ser supuesto por  $\mu = 1$  y el tensor de permitividad puede ser

reducido a una constante con una parte real ( $\epsilon'$ ) y otra imaginaria ( $\epsilon''$ ), donde puede ser incluido la conductividad  $\sigma$  (Tang, 2005), como se muestra en ecuación (20):

$$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0} \quad (20)$$

$$P_V = \frac{P}{V} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' \cdot E^2 \quad (21)$$

La Ec. (21) describe el poder volumétrico disipado  $P_V$  como función de la frecuencia de microondas  $f$ , propiedades dieléctricas ( $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r''$ ) y el campo eléctrico.

Conociendo la potencia disipada  $P_V$  como fuente de calor  $Q_{em}$ , Ec (12) se puede modificar como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = P_V \quad (22)$$

Las ecuaciones de electromagnetismo y de transferencia de calor están entonces acoplados (Knoerzer y Regier, 2008).

## 1.10 ZANAHORIA

La zanahoria es un vegetal común de raíz que ha sido domesticado durante miles de años. Pertenece a la familia de plantas *Apiaceae*, que incluye perejil, apio, chirivía y muchas otras verduras. Las zanahorias vienen en una variedad de colores, pero la mayoría de las zanahorias modernas son generalmente de color naranja. Estas verduras se pueden disfrutar crudas o cocidas tanto en platos dulces como salados. Las zanahorias tienen una variedad de beneficios para la salud. Las zanahorias no tienen grasa, además, son una gran fuente de betacaroteno, una sustancia química que el cuerpo convierte en vitamina A, que es un nutrimento importante que ayuda con la visión. De hecho, solo una zanahoria proporciona más del 200 por ciento del valor diario recomendado de vitamina A. También se ha demostrado que la fibra en las zanahorias ayuda a reducir el colesterol. Según diversas investigaciones, se ha demostrado que comer una dieta que incluya zanahorias ayuda a fortalecer los huesos y puede reducir el riesgo de diabetes y ciertos cánceres (Zukauskas, 2016)



Cuadro 1. Valor Nutricional de la Zanahoria. (ASHRAE, 2002)

<b>Componentes</b>	<b>(%)</b>
Agua	88
Carbohidratos	8.40
Lípidos	0
Proteína	0.76
Fibra	2.51
Cenizas	0.32

### 1.10.1 VITAMINA A.

La vitamina A de los alimentos es absorbida de dos formas principales. Los diversos carotenoides (predominantes del betacaroteno) que sirven como provitamina, existen principalmente en las plantas y los productos vegetales, por ejemplo, zanahorias, hortalizas de hojas verde oscuro, aceite de palma rojo, hortalizas y frutas amarillas. El retinol preformado (normalmente en forma de éster) se encuentra de manera natural solamente en alimentos de origen animal, como en el hígado y en los productos lácteos grasos. No obstante, la vitamina A preformada se usa a veces para enriquecer otros alimentos, tales como el azúcar y los productos de cereales.

En la forma de retinaldehído, la vitamina A actúa como el grupo de los pigmentos visuales que absorben la luz. La escasez de vitamina A causa de la formación insuficiente de rodopsina, el pigmento que interviene en la visión de baja intensidad (nocturna). La función sistémica de la vitamina A se relaciona con el mantenimiento del crecimiento, la salud en general y la vida misma. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991). Los componentes minerales y vitamínicos de la zanahoria se muestran en el cuadro 2:

Cuadro 2. Composición de vitaminas y de nutrimentos inorgánicos (base: 100 g de parte comestible) (Buadui, 2006)

<b>Componentes</b>	<b>Contenido</b>
<b>Calcio</b>	37.0 mg
<b>Hierro</b>	0.7 mg
<b>Vitamina A</b>	11 000 UI
<b>Tiamina</b>	0.06 mg
<b>Riboflavina</b>	0.05 mg
<b>Niacina</b>	0.6 mg
<b>Vitamina C</b>	8.0 mg

Para hacer referencia a su potencia biológica y a las recomendaciones de consumo, en la literatura técnica se emplean diversos términos, como Unidad Internacional (UI). La UI corresponde a 0.3 mg de retinol, a 0.6 mg de b-caroteno, o a 0.344 mg de acetato de trans-retinilo.

Los consumidores están demandando productos convenientes y de alta calidad con sabores y colores naturales, y un gran valor por la apariencia fresca de los productos mínimamente procesados (Oey et al., 2008).

El puré de zanahoria es particularmente una buena fuente de carotenoides/fenoles que han demostrado tener efectos contra enfermedades cardiovasculares, diabetes e infartos (Scalbert, 2000).

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1 OBJETIVO

Simular y validar los perfiles de temperatura dependientes del tiempo en una papilla de zanahoria mediante un modelo integral que acopla fenómenos electromagnéticos y de transferencia de calor usando un método numérico basado en un software comercial, para predecir la distribución de calor en un proceso de pasteurización del producto, basado en un modelo de inactivación microbiana,  $F_0$ , para establecer un producto seguro.

#### 2.1.1 OBJETIVO PARTICULAR 1.

Simular los perfiles de temperatura dependientes del tiempo en distintas localizaciones dentro del alimento mediante un modelo integral que acopla las ecuaciones de electromagnetismo de Maxwell y de transferencia de calor de Fourier, usando el método de diferencias finitas basado en un software comercial (COMSOL Multiphysics 4.3b), para predecir tanto el punto más frío, como el más caliente.

#### 2.1.2 OBJETIVO PARTICULAR 2.

Validar el modelo de simulación propuesto mediante historias térmicas de los distintos puntos de medición dentro del alimento, mediante un análisis estadístico (raíz cuadrada del error) para comprobar que se está simulando correctamente.

#### 2.1.3 OBJETIVO PARTICULAR 3.

Integrar un modelo de inactivación microbiana, tiempo de letalidad  $F_0$ , para inhibir la presencia de *Listeria monocytogenes* (Vervoot et al, 2012) con los datos del punto más frío dentro del producto como un indicador para establecer la seguridad del alimento.

## 2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.

### 2.2.1 CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DEL MODELO.

Este modelo considera la geometría real del objeto y su interacción con el horno de microondas. i) Cerca del fondo del horno hay un plato cilíndrico con la muestra de puré de zanahoria en la superficie de este. ii) Una parte de la muestra está cortada para estabilidad mecánica, el cual también facilita la creación de una malla de elementos finitos en la región donde este está en contacto con el plato. iii) La simetría se utiliza para simular solamente la mitad del problema. iv) El corte simétrico se aplica verticalmente a través del horno, guía de onda, la muestra de puré y el plato, como se muestra en la figura 5:

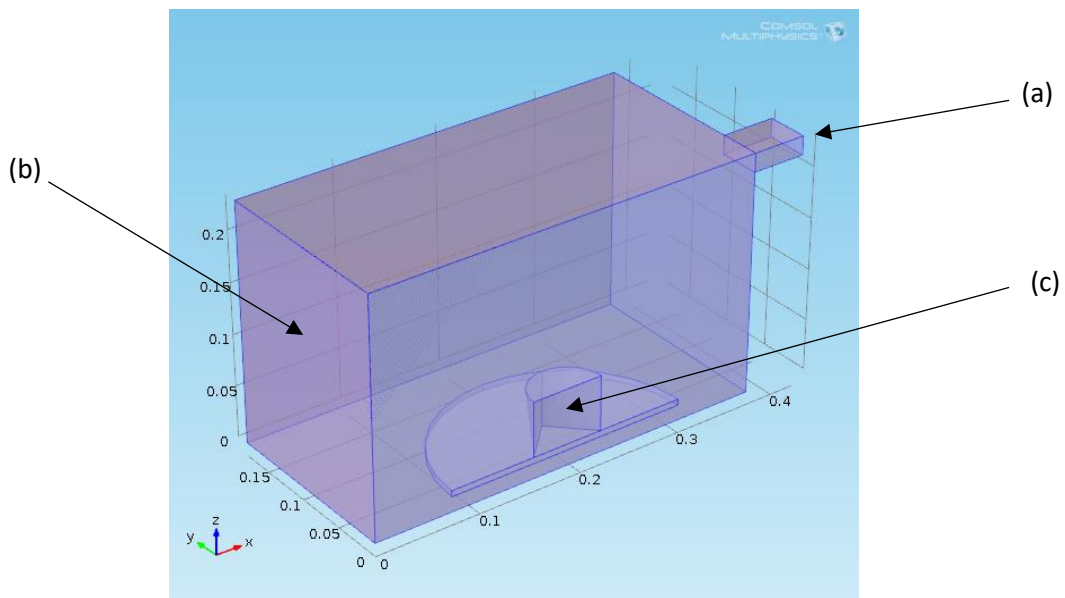


Figura 5. Esquema de corte de un horno de microondas. (a) guía de ondas, (b) Cavidad de resonancia y (c) muestra

Se hacen las siguientes suposiciones para el planteo del modelo y llevar a cabo la simulación del calentamiento por microondas:

- La temperatura inicial de la papilla de zanahoria se considera homogénea e isotrópica.
- La transferencia de masa (humedad) y de momentum no se consideran.
- Las propiedades térmicas, dieléctricas y de transporte son dependientes del tiempo.

- Tamaño constante (sin cambio de volumen).
- Condiciones de contorno convectivas.
- La rotación del plato del microondas no se considera, debido a que el software COMSOL Multiphysics 4.3a no tiene la capacidad de simular el calentamiento por microondas de alimentos en rotación por lo que el alimento se supone que se mantiene estático.

Para la distribución del campo electromagnético:

- La absorción de la energía electromagnética por parte del aire se consideró despreciable.
- Las paredes del horno se consideraron conductores perfectos.

En estas condiciones se considera válido el balance microscópico de energía (Ec.11) con las siguientes condiciones de frontera:

$$t = 0 \quad T_{(x,y,z)} = T_{ini}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_2) \quad t > 0$$

El calentamiento por microondas de un material dentro de un horno está gobernado por las ecuaciones de Maxwell (COMSOL, 2013).

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left( \varepsilon_{rc} - \frac{j\sigma}{\omega_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (23)$$

Siendo:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

donde  $\varepsilon_{rc}$  es la permitividad dieléctrica compleja,  $\mu_r$  es la permeabilidad magnética y  $k_0$ , es la constante de propagación definida como:

$$k_0 = \beta + i\alpha$$

$$\beta = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2}$$

donde  $f$  es la frecuencia de la radiación y  $c$  es la velocidad de la luz.

La ecuación 23 se resuelve considerando diferentes condiciones de frontera, como es: la cavidad del horno y las paredes de guía de onda están sometidas a una condición límite donde son perfectos conductores eléctricos, donde aplica la siguiente condición límite:

$$n \times E = 0 \quad (24)$$

En el plano central se tuvo en cuenta la condición de simetría (conductor magnético perfecto):

$$n \times H = 0 \quad (25)$$

La fuente de energía electromagnética se incorpora a través de condición de contorno de la guía de onda representando al puerto de entrada de las microondas. Este puerto rectangular es excitado por medio de una onda eléctrica transversal (modo TE), la cual no presenta componente del campo eléctrico en la dirección propagación. Considerando la frecuencia de operación del horno de microondas utilizados a nivel doméstico (2.45 GHz), el modo  $TE_{10}$  se considera como único modo de propagación a través de la guía de onda rectangular (Arballo et al., 2013)

El corte de frecuencias por los diferentes modos está dado analíticamente de la relación (COMSOL, 2013):

$$(f_c)_{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (26)$$

Donde  $m$  y  $n$  son el número de modos y  $c$  denota la velocidad de la luz. Para el modo  $TE_{10}$ ,  $m = 1$  y  $n = 0$ . Con las dimensiones de la sección rectangular ( $a = 7.8$  cm y  $b = 1.8$  cm), el modo  $TE_{10}$  es el único modo de propagación para frecuencias entre 1.92 GHz y 3.84 GHz.

El poder electromagnético se convierte en energía térmica con el medio. La conversión de energía electromagnética a energía térmica está gobernada por (Goldbith & Wang, 1967):

$$P_v = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (27)$$

El factor de pérdida dieléctrica (permitividad relativa) de un material debido a la conductividad eléctrica está dado por:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi \epsilon_0 f} \quad (28)$$

El término de poder disipado de microondas se considera como término fuente en la ecuación de transferencia de energía de Fourier (Pitchai et al; 2014).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + P_v(x, y, z, t) \quad (29)$$

La superficie del alimento intercambia calor con el aire circundante por convección, expresado como:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_2) \quad (30)$$

El intercambio de calor entre el aire y el alimento es aproximado, suponiendo un coeficiente de transferencia de calor de  $10 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , el cual es un valor típico de convección natural en el aire (Tong & Lund, 1993) .

### 2.2.2 VARIABLES TERMOFÍSICAS DEL PURÉ DE ZANAHORIA.

Las variables termofísicas: calor específico  $C_p$  en  $[\text{KJ/kg } ^\circ\text{C}]$ , la densidad en  $[\text{kg/m}^3]$ , la conductividad térmica  $K_t$  en  $[\text{W/m } ^\circ\text{C}]$  y la difusividad térmica en  $[\text{m}^2/\text{s}]$  del puré de zanahoria se obtuvieron utilizando un programa desarrollado en lenguaje Java donde a partir de ecuaciones de propiedades térmicas y los componentes químicos de la zanahoria se obtienen las propiedades termofísicas como se muestra en la figura 6:

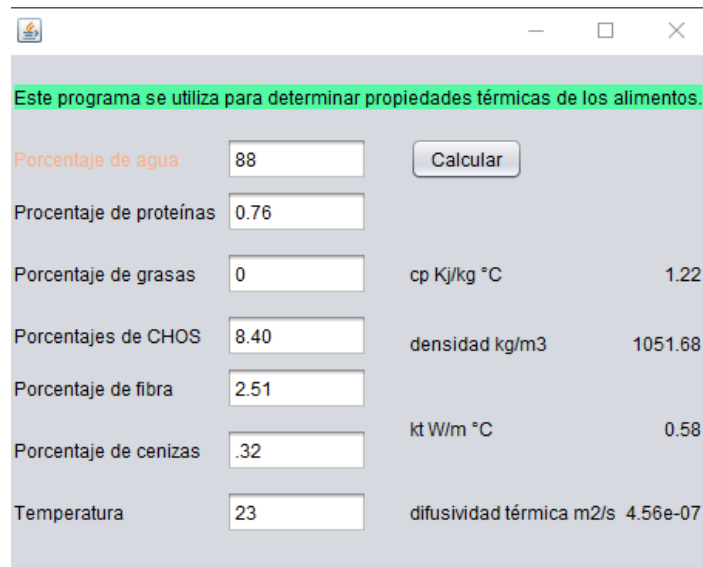


Figura 6. Aplicación en Java para obtener propiedades termofísicas de los alimentos.

### 2.3 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN.

En este apartado se describirá el “paso a paso” de cómo se construyó el modelo de simulación (COMSOL, 2013):

El modelo se construye a partir de una modalidad de COMSOL, llamado asistente “**wizard**”:

- 1) Ir a la ventana de “Model Wizard”
- 2) Dar click en Next
- 3) En el árbol de “Add physic”, seleccionar: “Heat Transfer>Electromagnetic Heating>Microwave Heating (mh)”.
- 4) Dar click en Next.
- 5) Encuentra la subsección “Studies”. En el árbol, seleccionar: “Present Studies>Frequency-Transient”.
- 6) Dar click en “Finish”.

### DEFINICIONES GLOBALES.

Primero, se define el set de parámetros para crear la geometría.



- 1) En la ventana de “Model Builder”, hacer click derecho en “Global Definitions” y seleccionar “Parameters”.
- 2) En la tabla, introducir las dimensiones del horno, la muestra y el plato como se muestra en la figura 7:

Name	Expression	Value	Description
wo	373[mm]	0.37300 m	Oven width
do	363[mm]	0.36300 m	Oven depth
ho	233[mm]	0.23300 m	Oven height
wg	50[mm]	0.050000 m	Waveguide width
dg	78[mm]	0.078000 m	Waveguide depth
hg	18[mm]	0.018000 m	Waveguide height
rp	113.5[mm]	0.11350 m	Glass plate radius
hp	6[mm]	0.0060000 m	Glass plate height
bp	15[mm]	0.015000 m	Glass plate base
rpur	33.5[mm]	0.033500 m	Puree radius
T0	23[degC]	296.15 K	Initial puree temperature
hpur	60[mm]	0.060000 m	Puree height

Figura 7. Definición de parámetros para crear la geometría.

Posteriormente, se procede a dibujar las geometrías que componen al modelo:

### Seleccionar **GEOMETRY 1**

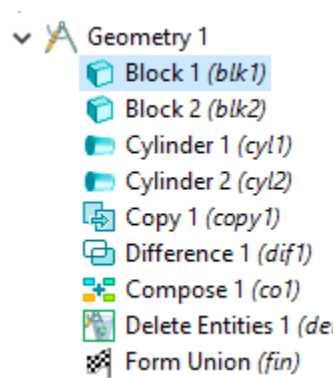


Figura 8. Geometry 1.

### Bloque 1(Block 1)

- 1) En la ventana de “Model Builder”, bajo Model 1 hacer click derecho en “Geometry 1” y seleccionar “Block”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Block”, localizar la sección “Size and Shape”.
- 3) En el campo de edición “Width”, escribir “wo”.

- 4) En el campo de edición “Depth”, escribir “do/2”.
- 5) En el campo de edición Height, escribir “ho”.

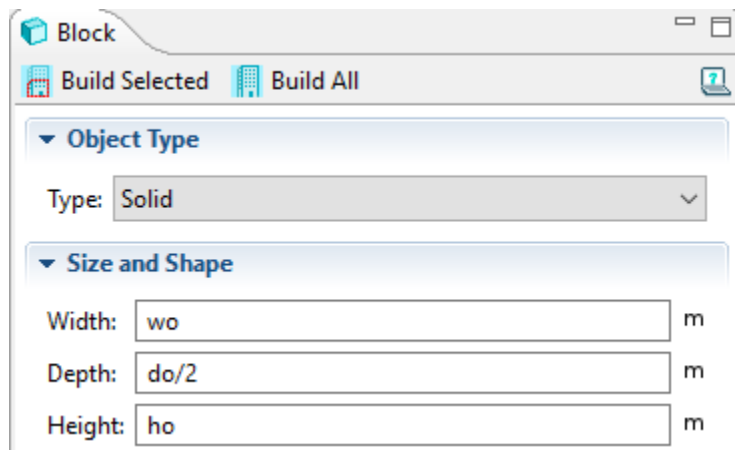


Figura 9. Parámetro “Block 1”.

#### Bloque 2 (Block 2)

- 1) En la ventana de “Model Builder”, hacer click derecho en “Geometry 1” y selecciona “Block”.
- 2) En la ventana de parámetros de Block, localizar la sección “Size and Shape”.
- 3) En el campo de edición “Width”, escribir “wg”.
- 4) En el campo de edición “Depth”, escribe “dg/2”.
- 5) En el campo de edición “Height”, escribe “hg”.
- 6) Localizar la sección de “Position”. En el campo de edición “X”, escribir “wo”.
- 7) En el campo de edición “Z”, escribir “ho – hg”.

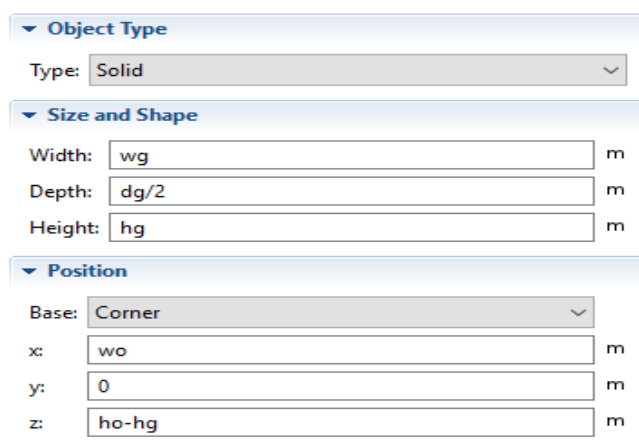


Figura 10. Parámetro “Block 2”.

### Cilindro 1 (Cylinder 1).

- 1) Hacer click derecho en "Geometry 1" y escoger "Cylinder".
- 2) En la ventana de parámetros de "Cylinder", localizar la sección "Size and Shape".
- 3) En el campo de edición "Radius", escribir "rp".
- 4) En el campo de edición "Height", escribir "hp".
- 5) Localizar la sección de "Position". En el campo de edición "X", escribir " $w_0/2$ ".
- 6) En el campo de edición "Z", escribir "bp".

Object Type	
Type:	Solid

Size and Shape	
Radius:	rp m
Height:	hp m

Position	
x:	wo/2 m
y:	0 m
z:	bp m

Figura 11. Parámetro "Cylinder 1".

### Cilindro 2 (Cylinder 2).

- 1) Hacer click derecho en "Geometry 1" y escoger "Cylinder".
- 2) En la ventana de parámetros de "Cylinder", localizar la sección "Size and Shape".
- 3) En el campo de edición de "Radius", escribir "r<sub>pur</sub>".
- 4) En el campo de edición de "Height", escribir "h<sub>pur</sub>".
- 5) Localizar la sección de "Position". En el campo de edición de "X", escribir " $w_0/2$ ".
- 6) En el campo de edición "Z", escribir "bp".
- 7) Hacer click en el botón "Build All".

▼ Object Type  
Type: Solid

▼ Size and Shape  
Radius:  $r_{pur}$  m  
Height:  $h_{pur}$  m

▼ Position  
x:  $w_o/2$  m  
y: 0 m  
z:  $b_p$  m

Figura 12. Parámetro “Cylinder 2”.

El cilindro que se ha creado para la muestra de puré, superpone el plato de vidrio. Esto por sí mismo no es un problema, pero donde el cilindro toque el fondo del plato, el riesgo es obtener elementos de malla muy delgados. Para evitar esta situación, se tendrá que eliminar la parte del cilindro que superpone el cilindro que representa el plato. Para conservar el plato de vidrio después de esta operación, se procede por hacer una copia de este:

Copy 1

- 1) Hacer click derecho en “Geometry 1” y escoger “Transforms>Copy”.
- 2) Seleccionar únicamente el objeto “cyl1” (cilindro que representa el plato).

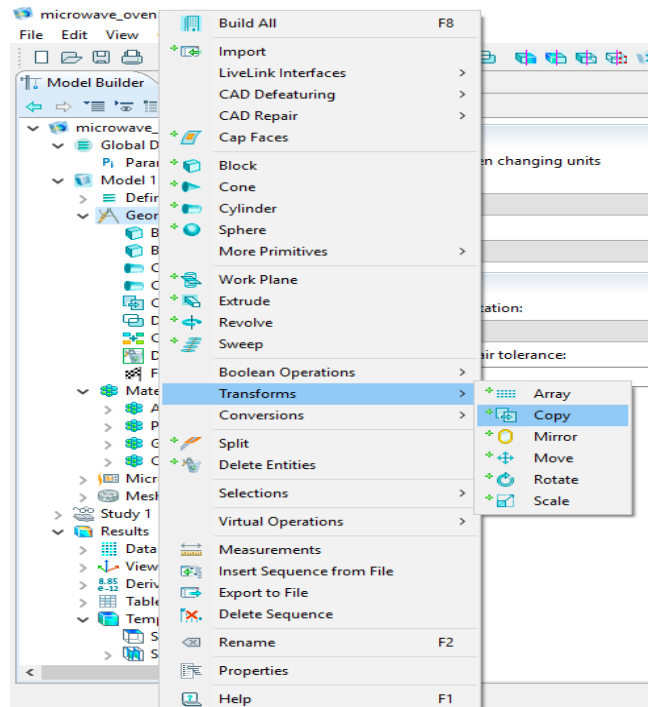


Figura 13. Hacer click derecho en “Geometry 1” y escoger “Transforms>Copy”.

#### Difference 1

- 1) Hacer click derecho en “Geometry 1” y escoger “Boolean Operations>Difference”.
- 2) Seleccionar solo el objeto “cyl2” (cilindro que representa el puré) y agregarlo a la lista “Objects to add”.
- 3) En la ventana de parámetros “Difference”, localizar la sección “Difference”.
- 4) Debajo de “Objects to subtract”, hacer click en “Activate Selection”.
- 5) Seleccionar únicamente el objeto “cyl1”
- 6) Hacer click en el botón “Build All”.

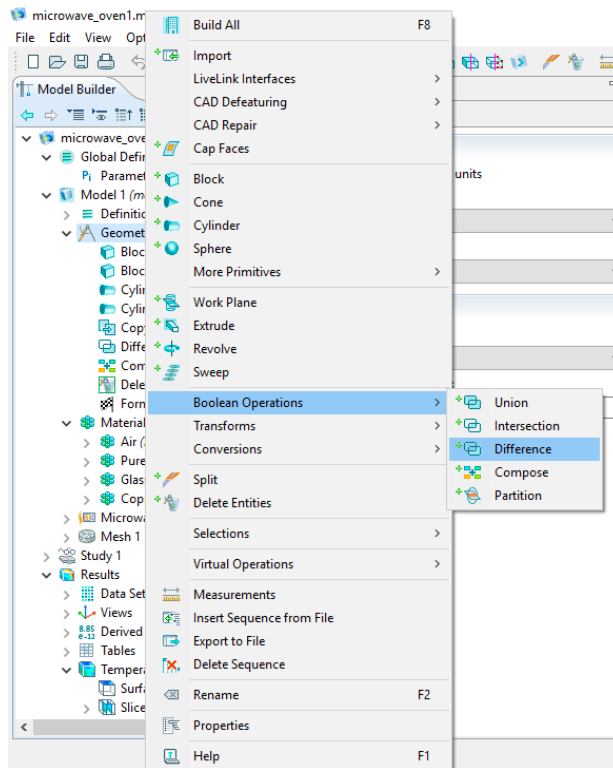


Figura 14. Hacer click derecho en “Geometry 1” y escoger “Boolean Operations>Difference”.

Finalmente, resta realizar una operación geométrica para mantener solo la parte del puré y el plato que se superpone a la mitad horno:

#### Compose 1

- 1) Hacer click derecho en “Geometry 1” y seleccionar “Boolean Operations>Compose”.
- 2) Hacer click en la ventana de “Graphics” y seleccionar todos los objetos.
- 3) En la ventana de parámetros “Compose”, localizar la sección “Compose”.
- 4) En el campo de edición “Set Formula”, escribir  $(blk1+blk2) * (dif1+copy1)$ .
- 5) Seleccionar “Keep input objects”.
- 6) Hacer click en el botón “Build All”.

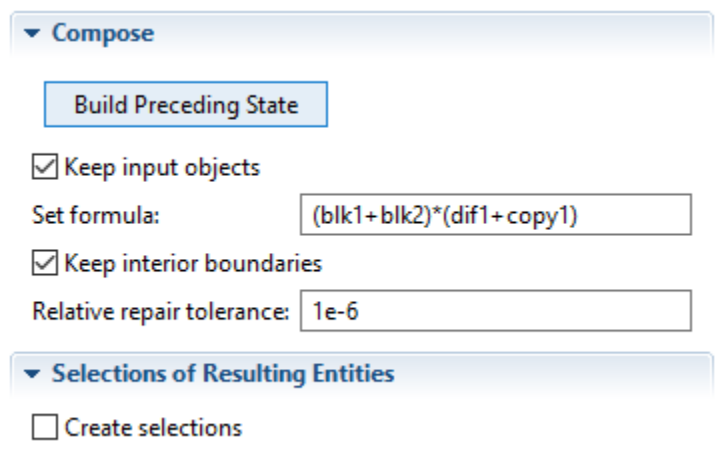


Figura 15. Se procede con esta operación para seleccionar los objetos que se superponen a la mitad del plato.

#### Delete Entities 1.

- 1) Hacer click derecho en “Geometry 1” y seleccionar “Delete Entities”
- 2) En la ventana de parámetros “Delete Entities”, localizar la sección “Entities or Objects to Delete”.
- 3) De la lista “Geometric entity level”, seleccionar “Object”.
- 4) Seleccionar únicamente los objetos “dif1” y “copy1”.
- 5) Hacer click en “Build All”.
- 6) Hacer click en el botón “Wireframe Rendering” de la barra de herramientas “Graphics”.

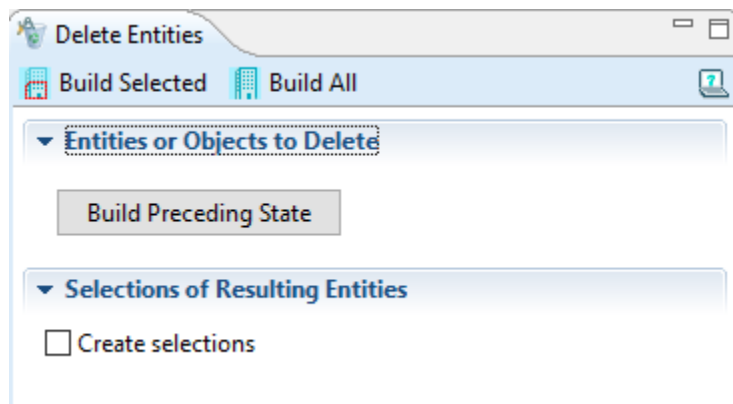


Figura 16. Se procede a eliminar los objetos que se superponen con la herramienta “Delete Entities”.

## DEFINICIONES

Se crean las siguientes definiciones para diferenciar entre el dominio y los límites.

Explicit 1.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1 hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 1” y seleccionar “Rename”.

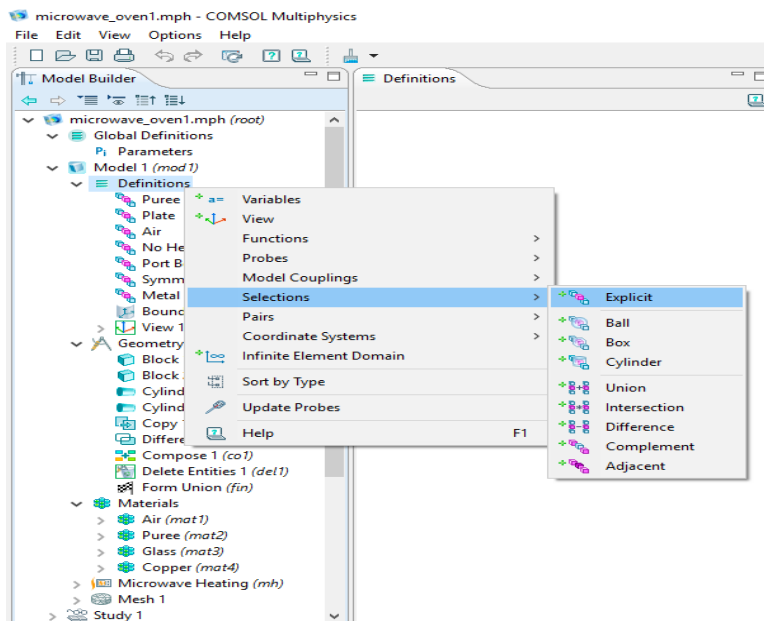


Figura 17. Se crean las definiciones para diferenciar cada geometría del modelamiento.

- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *Pure* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) Seleccionar únicamente “Domain 3”.



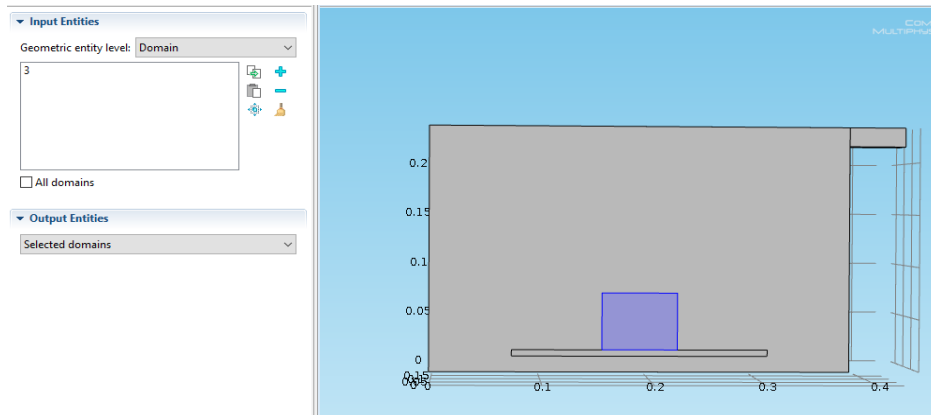


Figura 18. Localizar “Rename Explicit” y escribir *Pure* (dominio 3) en el campo de edición de “New Name”.

## Explicit 2.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1 hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 2” y seleccionar “Rename”.
- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *Plate* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) Seleccionar únicamente “Domain 2”.

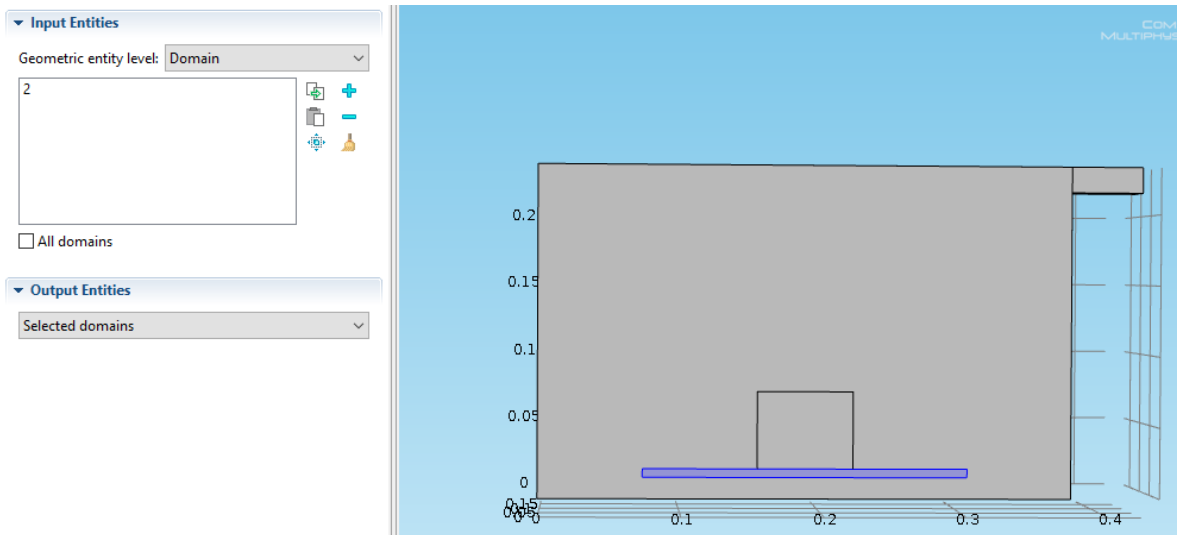


Figura 19. Localizar “Rename Explicit” y escribir *Plate* (dominio 2) en el campo de edición de “New Name”.

### Explicit 3.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1 hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 3” y seleccionar “Rename”.
- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *Air* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) Seleccionar únicamente “Domains 1 y 4”.

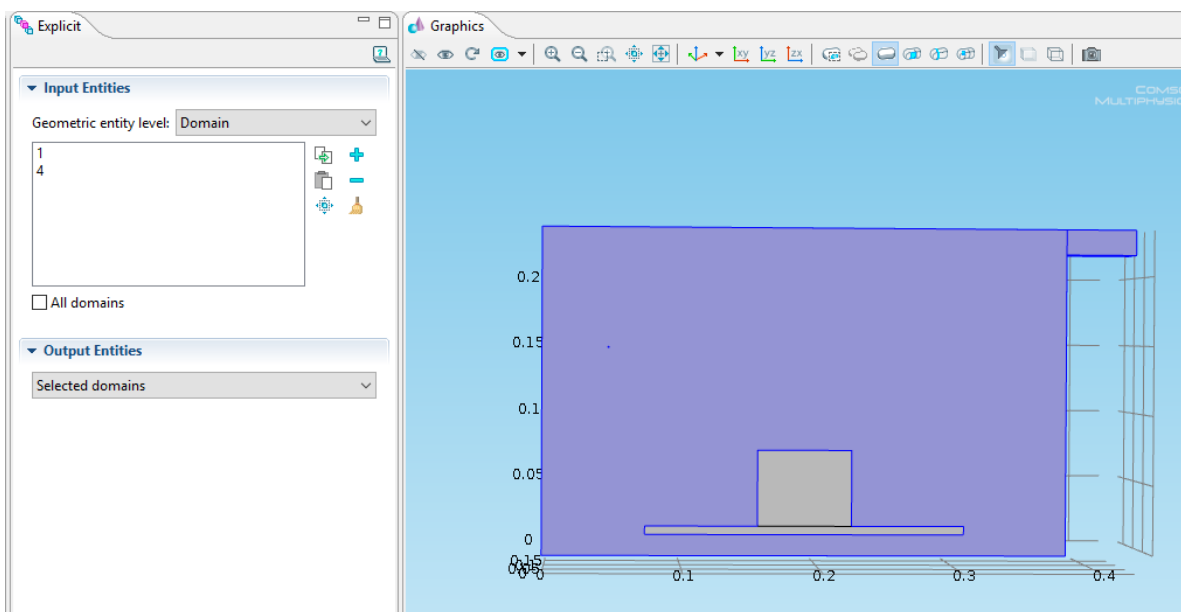


Figura 20. Localizar “Rename Explicit” y escribir *Air* (dominio 1 y 4) en el campo de edición de “New Name”.

### Explicit 4.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1 hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 4” y seleccionar “Rename”.
- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *No Heat transfer* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) Seleccionar únicamente “Domains 1, 2 y 4”.

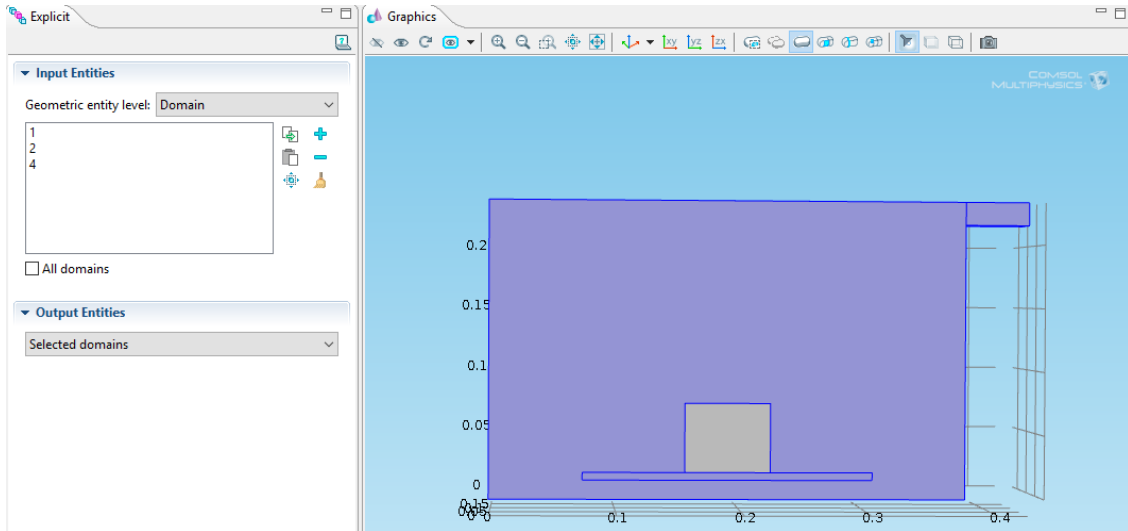


Figura 21. Localizar “Rename Explicit” y escribir *No Heat transfer* (dominio 1,2 y 4) en el campo de edición de “New Name”.

#### Explicit 5.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1 hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 5” y seleccionar “Rename”.
- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *Port Boundary* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) En la ventana de parámetros “Explicit”, localizar la sección “Input Entities”.
- 6) De la lista de “Geometric entity level”, seleccionar “Boundary”.
- 7) Seleccionar únicamente “Domain 23”.

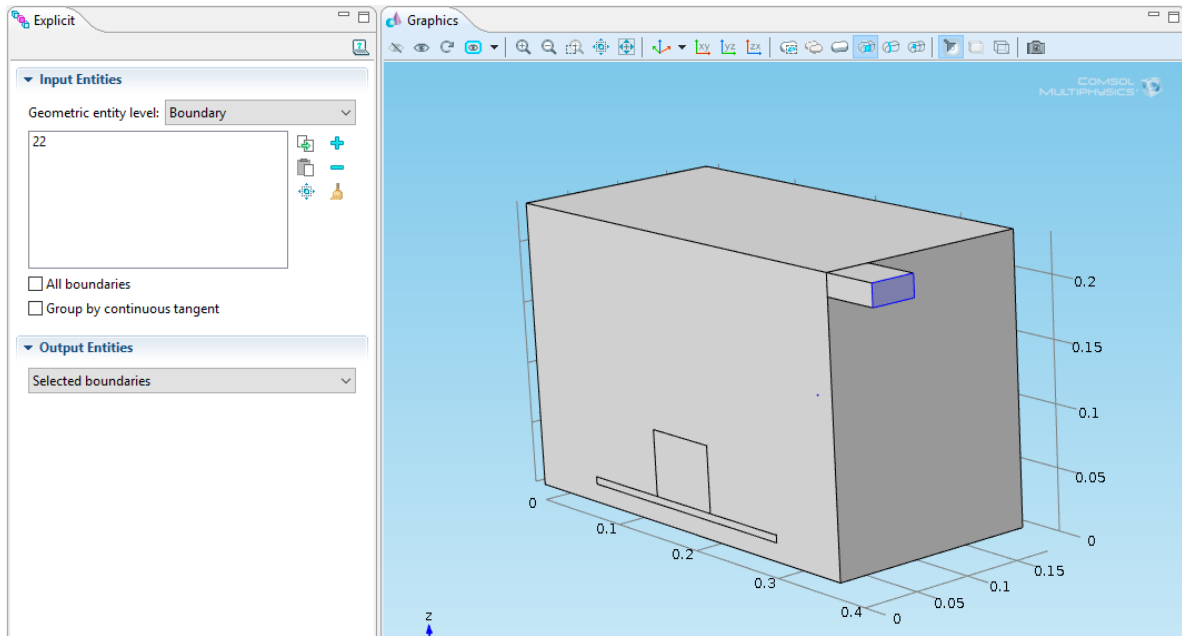


Figura 22. Localizar “Rename Explicit” y escribir *Port Boundary* (dominio 23) en el campo de edición de “New Name”.

#### Explicit 6.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1 hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 6” y seleccionar “Rename”.
- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *Symmetry Boundaries* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) En la ventana de parámetros “Explicit”, localizar la sección “Input Entities”.
- 6) De la lista de “Geometric entity level”, seleccionar “Boundary”.
- 7) Seleccionar únicamente “Domains 2, 7, 10 y 19”.

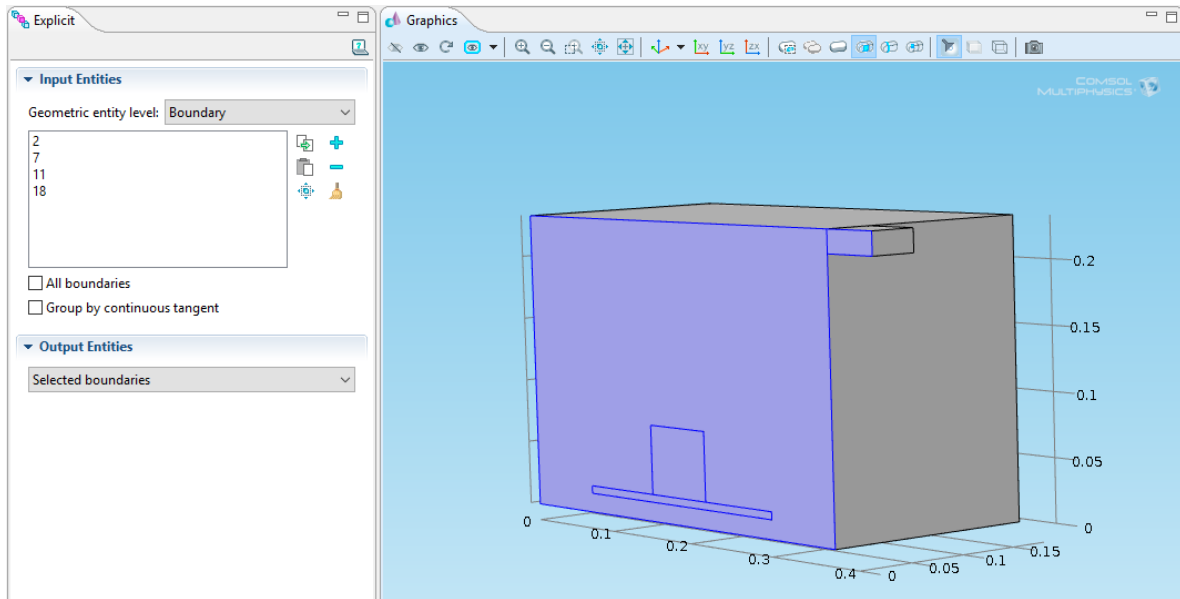


Figura 23. Localizar “Rename Explicit” y escribir *Symmetry Boundaries* (dominio 2, 7, 11 y 18) en el campo de edición de “New Name”.

#### Explicit 7.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de Model 1, hacer click derecho en “Definitions” y seleccionar “Selections>Explicit”.
- 2) Hacer click derecho en “Explicit 5” y seleccionar “Rename”.
- 3) Localizar “Rename Explicit” y escribir *Metal Boundaries* en el campo de edición de “New Name”.
- 4) Hacer click en “Ok”.
- 5) En la ventana de parámetros “Explicit”, localizar la sección “Input Entities”.
- 6) De la lista de “Geometric entity level”, seleccionar “Boundary”.
- 7) Seleccionar únicamente “Domains 1, 3-5, 17 y 20-22”.

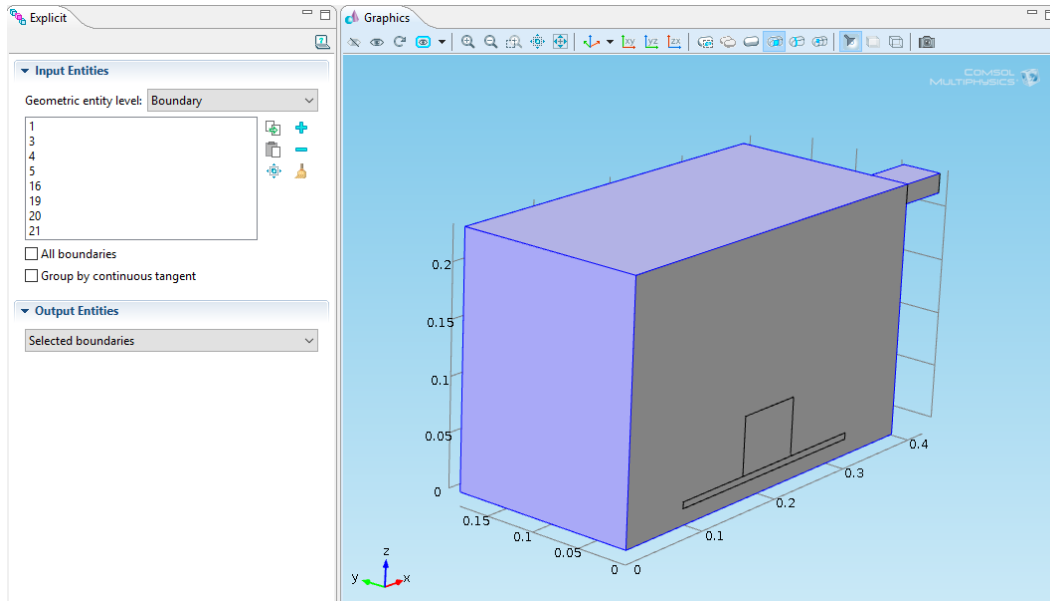


Figura 24. De la lista de “Geometric entity level”, seleccionar “Boundary” y seleccionar únicamente “Domains 1, 3-5, 17 y 20-22”.

## MATERIALES.

A continuación, se definen los materiales. Aire y cobre ya están precargados en la librería de materiales.

Navegador de Materiales. Material Browser.

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de “Model 1” hacer click derecho en “Materials” y seleccionar “Open Material Browser”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Material Browser”, en el árbol, seleccionar Built-In>Air.
- 3) Hacer click en “Add Material to Model”.

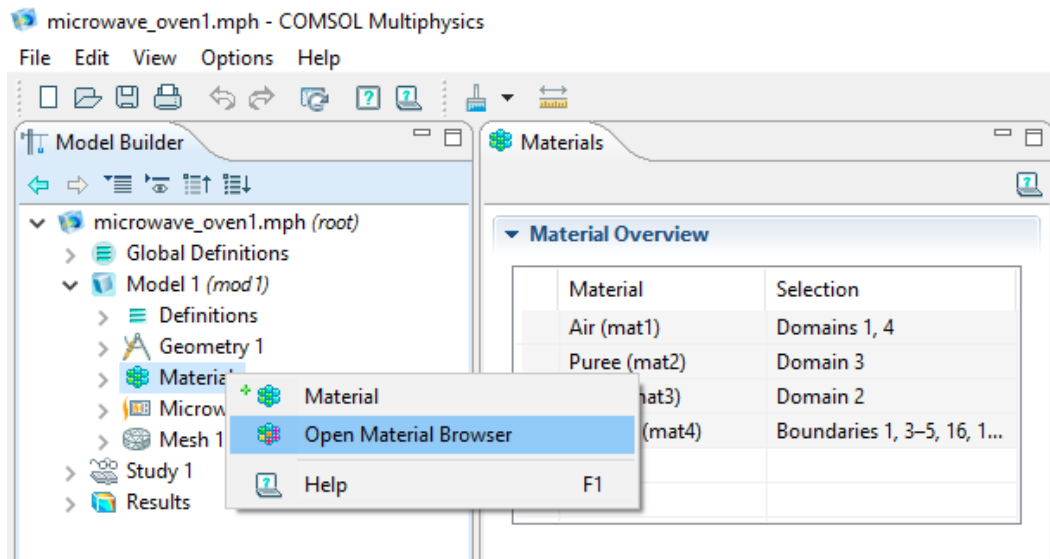


Figura 25. Se procede a definir los materiales del modelo.

Aire.

- 1) En la ventana "Model Builder", debajo de "Model 1>Materials", hacer click en "Air".
- 2) En la ventana de parámetros de "Material", localizar la sección "Geometric Entity Selection".
- 3) De la lista de "Selection", seleccionar "Aire"

Pure (Material 2).

- 1) En la ventana "Model Builder", hacer click derecho en "Materials" y seleccionar "Material".
- 2) Hacer click derecho en "Material 2" y seleccionar "Rename".
- 3) Ir a la ventana de diálogo "Rename Material" y escribir *Pure* en el campo de edición "New name".
- 4) Hacer click en "OK".
- 5) En la ventana de parámetros "Material", localizar la sección "Geometric Entity Selection"
- 6) De la lista de "Selection", seleccionar "Pure"
- 7) Localizar la sección "Material Contents" y en la tabla introducir las propiedades que se requiere la tabla. En el apartado 3.1 se explica cómo se

obtuvieron las propiedades físicas.

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Electrical conductivity	sigma	0	S/m	Basic
✓	Relative permittivity	epsil	72.77-20.08*j	1	Basic
✓	Relative permeability	mur	1	1	Basic
✓	Thermal conductivity	k	0.58	W/(m·K)	Basic
✓	Density	rho	1051.68	kg/m <sup>3</sup>	Basic
✓	Heat capacity at constant pr...	Cp	1220	J/(kg·K)	Basic

Figura 26. Propiedades electro y termo físicas del puré de zanahoria.

Vidrio (Material 3).

- 1) En la ventana “Model Builder”, hacer click derecho en “Materials” y seleccionar “Material”.
- 2) Hacer click derecho en “Material 3” y seleccionar “Rename”.
- 3) Ir al cuadro de diálogo “Rename Material” y escribir *Glass* en el campo de edición “New name”.
- 4) Hacer click en “OK”.
- 5) En la ventana de parámetros de “Material”, localizar la sección “Geometric Entity Selection”.
- 6) De la lista de “Selection”, seleccionar “Plate”.
- 7) Localizar la sección “Material Contents” y en la tabla introducir los siguientes valores (Apartado 3.1, propiedades dieléctricas del vidrio):

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Electrical conductivity	sigma	0	S/m	Basic
✓	Relative permittivity	epsil	2.55	1	Basic
✓	Relative permeability	mur	1	1	Basic

Figura 27. Propiedades dieléctricas del vidrio

No se necesita definir las propiedades térmicas de este material, ya que el plato de vidrio no estará en la parte térmica del modelo.



Cobre (Material 4).

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de “Model 1” hacer click derecho en “Materials” y seleccionar “Open Material Browser”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Material Browser”, en el árbol, seleccionar “Built-In>Copper”.
- 3) Hacer click en “Add Material to Model”.
- 4) En la ventana “Model Builder”, debajo de “Model 1>Materials”, hacer click en “Copper”.
- 5) En la ventana de parámetros de “Material”, localizar la sección “Geometric Entity Selection”.
- 6) De la lista de “Geometric entity level”, seleccionar “Boundary”.
- 7) De la lista de “Selection”, seleccionar “Metal Boundaries”.

### **CALENTAMIENTO POR MICROONDAS (MICROWAVE HEATING).**

Se procede a configurar la física del fenómeno. Lo primero que se debe hacer es asignar un modelo de ondas electromagnéticas a los dominios que no participan en el problema térmico.

Ecuación de ondas (Electric 1)

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de “Model 1”, hacer click derecho en “Microwave Heating” y seleccionar la condición de dominio “Electromagnetic Waves>Wave Equation, Electric”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Wave Equation, Electric”, localizar la sección “Domain Selection”.
- 3) De la lista de “Selection”, seleccionar “No Heat Transfer”.

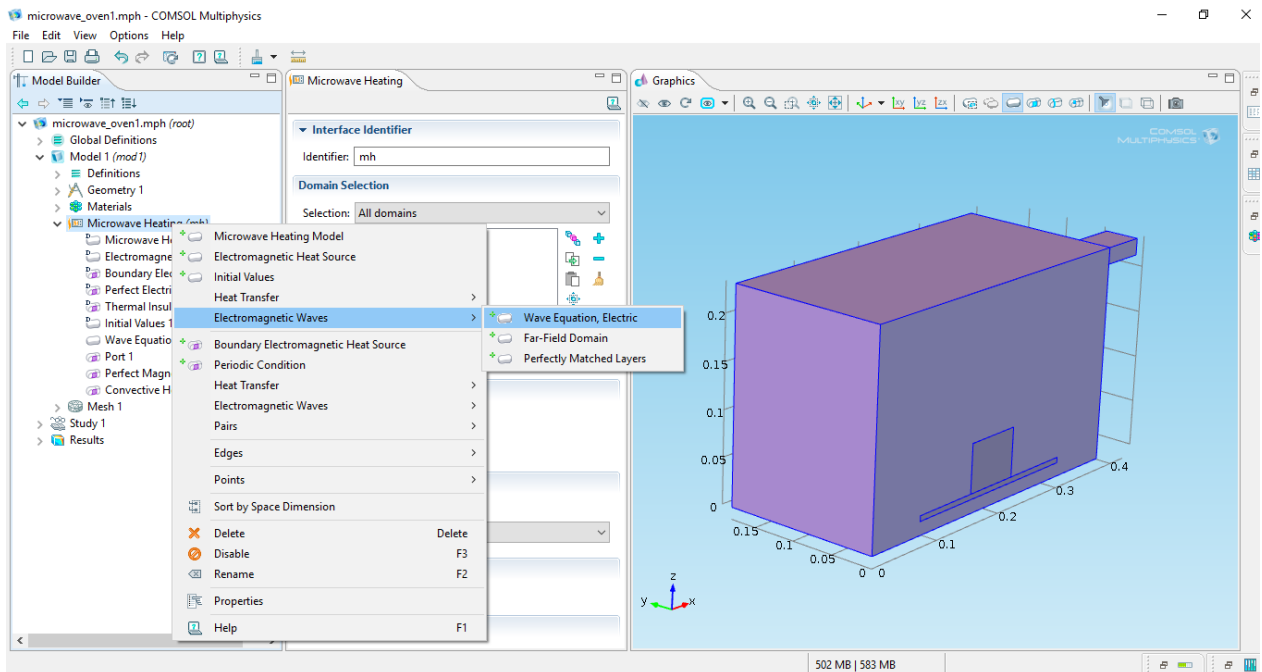


Figura 28. Se procede a asignar un modelo de ondas electromagnéticas a los dominios que no participan en el problema térmico.

Para la parte electromagnética del problema, se comienza por definir el puerto de entrada.

Puerto 1 (Port 1).

- 1) En la ventana de “Model Builder”, hacer click derecho en “Microwave Heating” y seleccionar la condición de frontera “Electromagnetic>Port”.
- 2) En la ventana de parámetros “Port”, localizar la sección “Boundary Selection”.
- 3) De la lista de “Selection”, seleccionar “Port Boundary”.
- 4) Localizar las propiedades en “Port Properties”. De la lista de “Wave excitation at this port”, seleccionar “On”.
- 5) En  $P_{in}$  escribir 1000, pues es la potencia con la que trabaja el horno de microondas en el experimento.

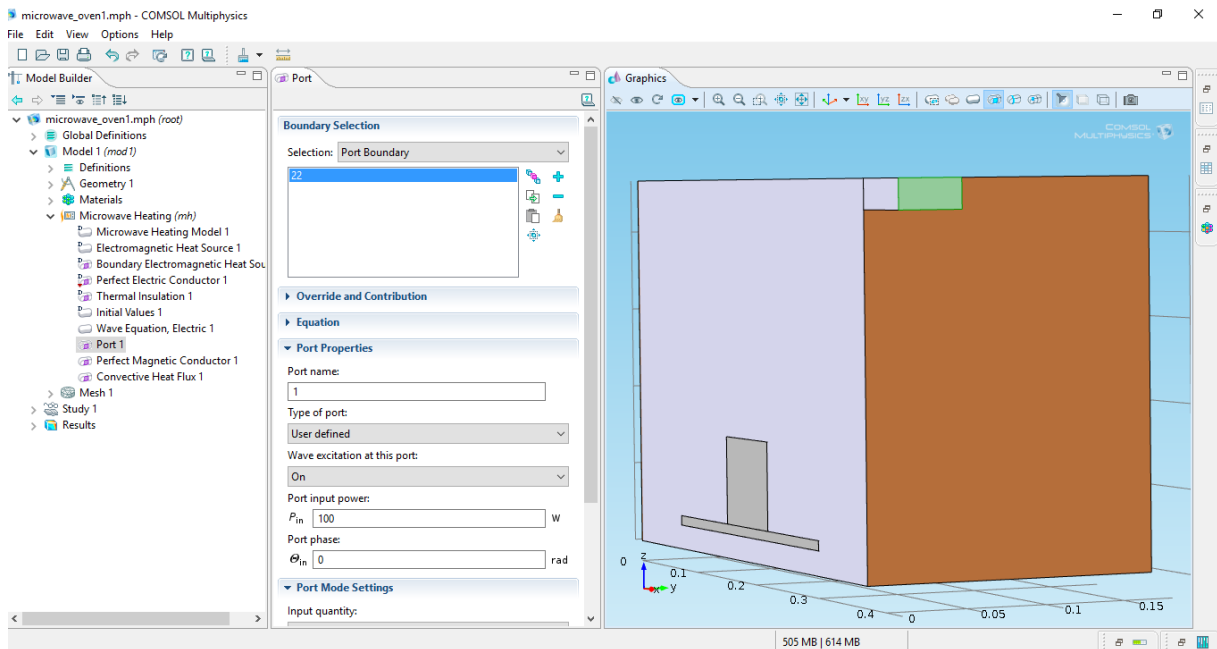


Figura 29. Se asignan la potencia con la que trabajará el modelo, para el caso del presente trabajo, es de 1000 W.

### Perfecto Conductor Magnético 1 (Perfect Magnetic Conductor 1).

- 1) Hacer click derecho en “Microwave Heating” y seleccionar la condición límite “Electromagnetic Waves>Perfect Magnetic Conductor”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Perfect Magnetic Conductor”, localizar la sección “Boundary Selection”.
- 3) De la lista de “Selection”, seleccionar “Symmetry Boundaries”.

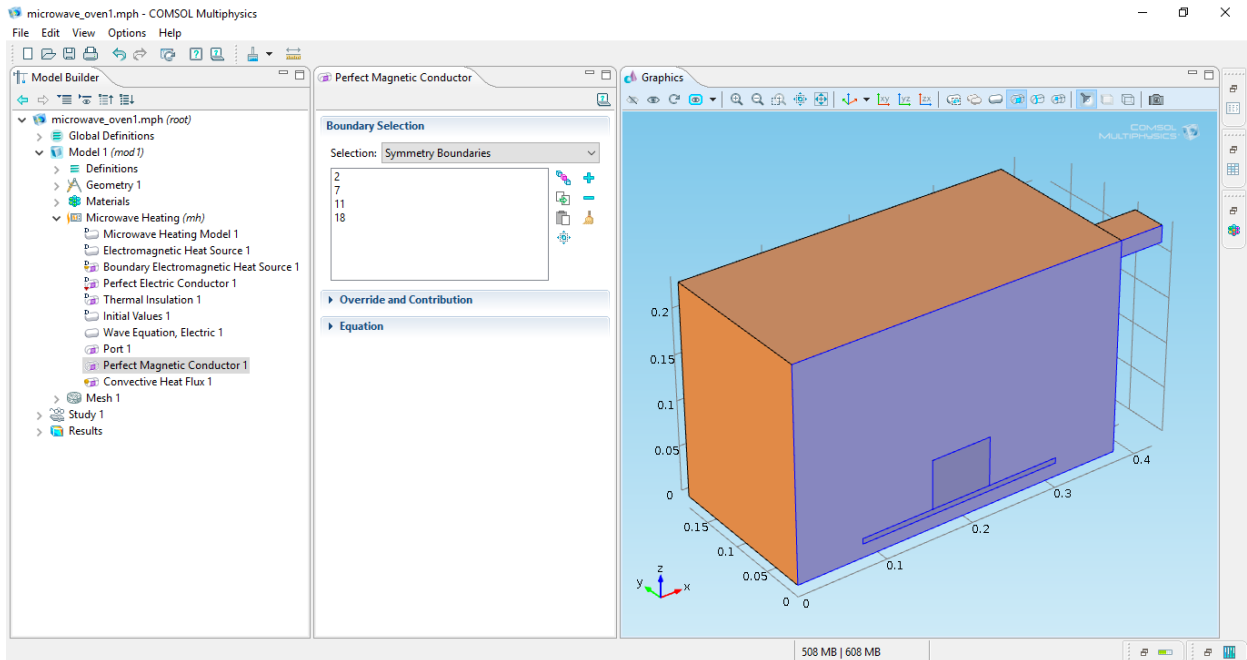
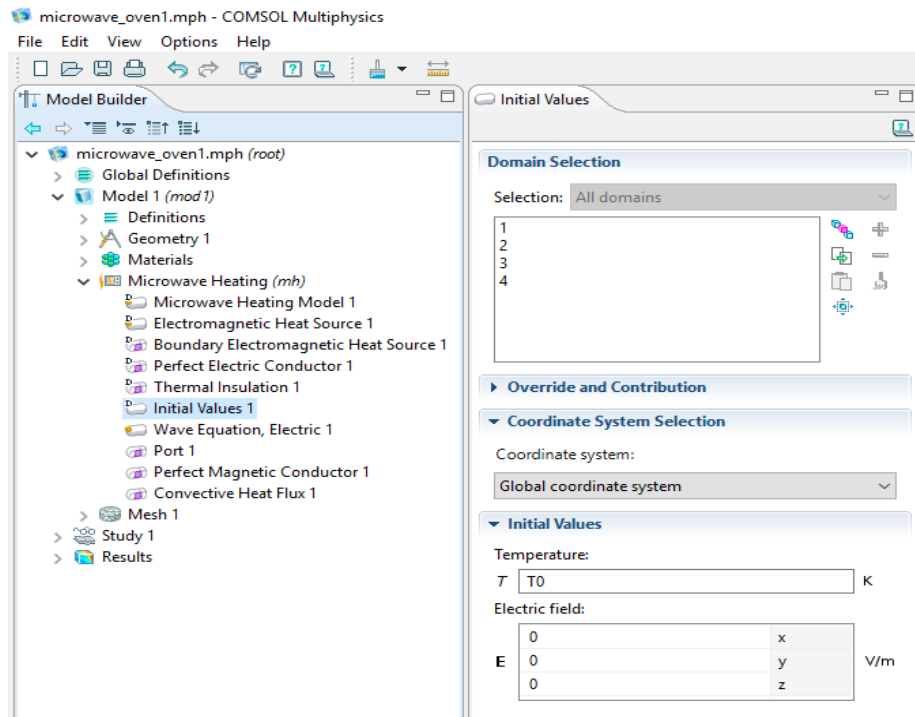


Figura 30. En la ventana de parámetros de “Perfect Magnetic Conductor”, localizar la sección “Boundary Selection” y de la lista de “Selection”, seleccionar “Symmetry Boundaries”, que es donde se aplicarán la condición de perfecto conductor magnético.

Esto concluye la parte electromagnética del fenómeno. La parte térmica obtendrá automáticamente la fuente de calor del modelo de calentamiento por microondas. El aislamiento térmico es la condición límite predeterminada, por lo que la única configuración que debe realizar es la temperatura inicial.

Valores Iniciales 1 (Initial Values 1).

- 1) En la ventana “Model Builder”, debajo de “Model1>Microwave Heating”, hacer clic en “Initial Values 1”
- 2) En la ventana de parámetros de “Initial Values”, localizar la sección “Initial Values”.
- 3) En el campo de edición de  $T$ , escribir  $T_0$ .



Figuro 31. En la ventana de parámetros de “Initial Values”, localizar la sección “Initial Values” y en el campo de edición de  $T$ , escribir  $T_0$ .

### Enmallado (Mesh 1)

Para garantizar la convergencia y obtener un resultado preciso, se requiere que la malla de este modelo resuelva en cualquier parte la longitud de onda. Esto es más crítico en el puré, donde la alta permitividad resulta en una longitud de onda de poco más de 15 mm.

### Enmallado Tetraédrico (Free Tetrahedral 1).

En la ventana de “Model Builder”, debajo de “Model1”, hacer clic derecho en “Mesh 1” y seleccionar “Free Tetrahedral”.

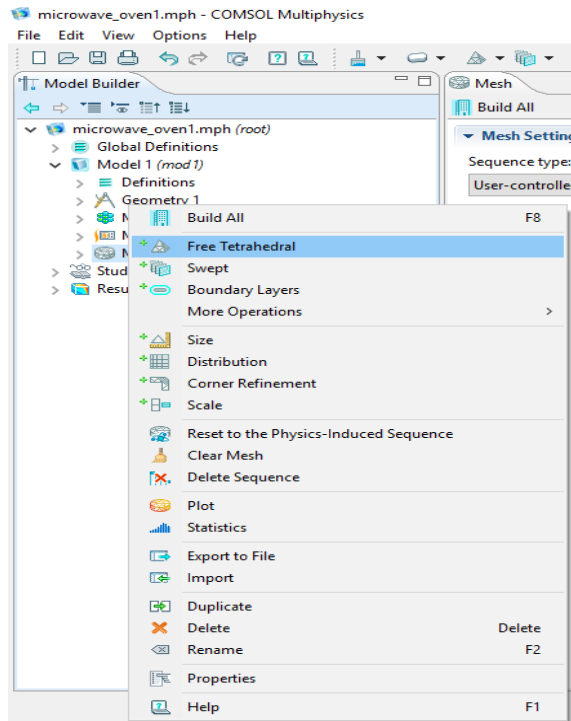


Figura 32. Para garantizar la convergencia y obtener un resultado preciso, se requiere que la malla de este modelo resuelva en cualquier parte la longitud de onda

Tamaño (Size 1).

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de “Model 1>Mesh 1”, hacer click derecho en “Free Tetrahedral 1” y seleccionar “Size”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Size”, localizar la sección “Geometric Entity Selection”.
- 3) De la lista de “Geometric entity”, seleccionar “Domain”.
- 4) De la lista de “Selection”, seleccionar “Pure”.
- 5) Localizar la sección “Element Size”. De la lista de “Predefined”, seleccionar “Finer”.
- 6) Hacer click en el botón de “Custom”.
- 7) Localizar la sección “Element Size Parameters”. Seleccionar “Maximum element size”.
- 8) Escribir 6 [mm] en el campo de edición.
- 9) Hacer click en “Build All”.

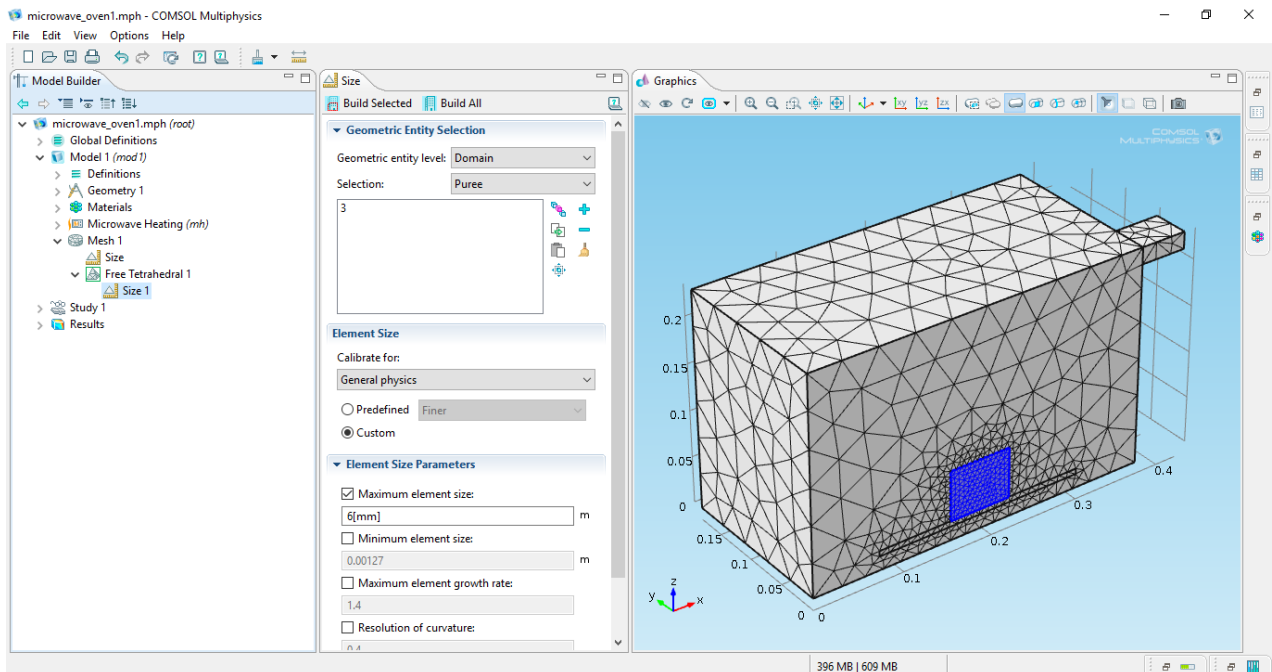


Figura 33. Localizar la sección “Element Size Parameters”. Seleccionar “Maximum element size” y escribir 6 [mm] en el campo de edición.

Se procede a seleccionar el tipo de estudio que se requiera que el software realice.

## STUDY 1

En este apartado, se fijarán las condiciones de tiempo y frecuencia con las que el modelo trabajará.

Paso 1: Frecuencia transitoria (Step 1: Frequency-Transient).

- 1) En la ventana de “Model Builder”, debajo de “Study 1”, hacer click en “Step 1: Frequency-Transient”.
- 2) En la ventana de parámetros de “Frequency-Transient”, localizar la sección “Study Settings”.
- 3) En el campo de edición de “Times”, escribir los rangos (0, 1, 190). Esto dará una salida a cada segundo de  $t = 0$  a  $t = 190$  s.
- 4) En el campo de edición “Frequency”, escribir 2.45 [GHz], que es la frecuencia con la que se trabaja en el experimento.
- 5) En la ventana de “Model Builder”, hacer click derecho en “Study 1” y seleccionar “Compute”.

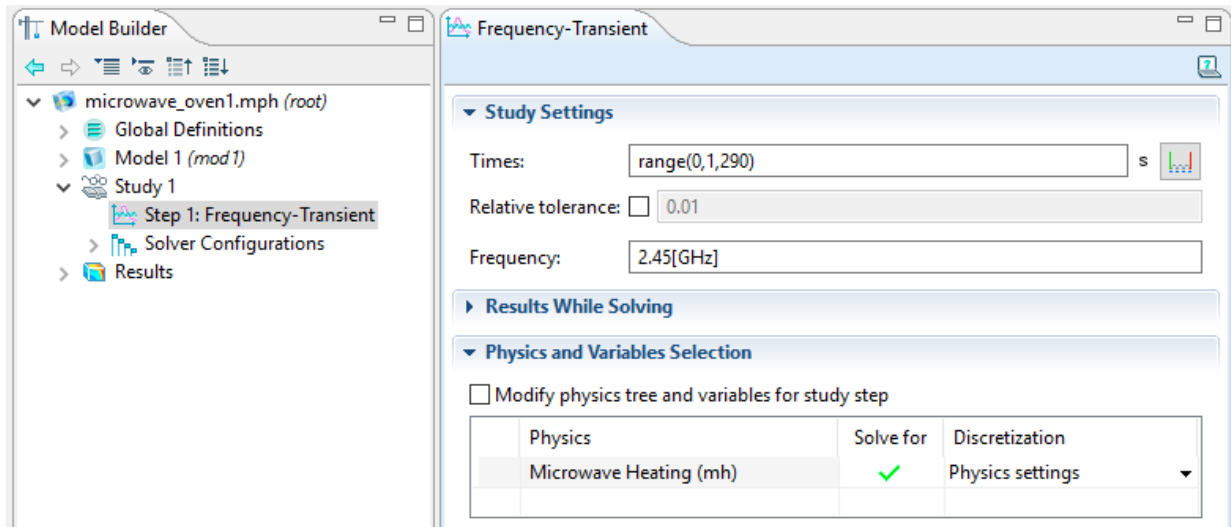


Figura 34. En el módulo de “Study 1”, se procede a determinar las condiciones con las que el modelo simulará el calentamiento  $T = 0$  a  $T = 190$  y una frecuencia de 2.45 GHz.

Con esto se finaliza el modelamiento físico del fenómeno.

## 2.4 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Las zanahorias fueron obtenidas de un mercado local. Después de ser lavadas con agua del grifo, fueron cortadas en cuadritos y/o rodajas, para posteriormente ser homogenizadas con una licuadora de mano (marca Hamilton Beach de dos velocidades), tal como se muestra en la figura 35:



Figura 35. Proceso de homogenización de zanahoria.

La papilla fue vaciada en vasos de precipitados de 250 mL. Se hicieron muestras homogéneas en peso y volumen, colocando 210 gramos de papilla en cada uno.





Figura 36. Papilla pesada en balanza.

## 2.5 PERFIL DE TEMPERATURA.

Para el calentamiento por microondas se utilizó un horno de microondas doméstico (Modelo MC32K7055, SAMSUNG) con las siguientes características (cuadro 7).

Cuadro 7. Características generales del horno de microondas.

Fuente de alimentación	120 V
Consumo de energía	1600 W
Potencia de salida	100 W
Frecuencia de funcionamiento	2450 MHz
Dimensiones en el exterior	523 x 309 x 486 mm
Dimensiones en el interior (cavidad del horno)	373 x 233 x 363 mm
Volumen	32 litros
Peso neto	20 kg.

La estrategia de medición de temperatura fue la siguiente: Tener la muestra lista para ser calentada en el microondas cada 10 segundos con una potencia de 1000 watts e inmediatamente leer la temperatura de los distintos puntos propuestos con un termómetro portátil HI 98509 de marca HANNA. Repetir este procedimiento hasta alcanzar la temperatura que se desea.

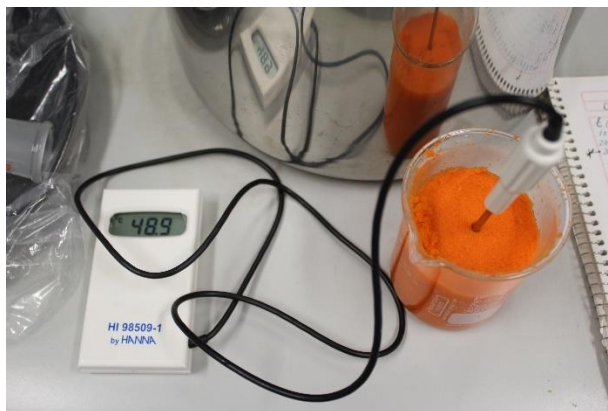


Figura 37. Medición de temperatura con termómetro HANNA, de la muestra después de ser calentado en el microondas.

## 2.6 MEDICIÓN DE EXACTITUD DEL MODELO

La medición de exactitud del modelo se calcula para comparar la desviación entre las temperaturas simuladas y las experimentales en diferentes puntos a lo largo del tiempo  $t$ . El perfil de temperaturas simulado se compara con el promedio del perfil de temperaturas experimental, mediante la raíz cuadrada del error (RMSE, por sus siglas en inglés):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_p - T_0)^2} \quad (31)$$

Donde  $T_p$  representa la temperatura simulada en el punto de medición ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $T_0$  es la temperatura observada experimentalmente ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 2.7 INTEGRACIÓN DE UN MODELO DE INACTIVACIÓN MICROBIANA.

Para establecer la inocuidad del alimento, se toma como referencia el perfil de temperatura en el punto más frío dentro del alimento durante el proceso. En términos generales, y aplicando un margen de seguridad conservador, se considera que el tiempo de reducción decimal a la temperatura de referencia de  $70^{\circ}\text{C}$  ( $D_{70}$ ) para *L. monocytogenes* es del orden de 0.33 minutos. Por tanto, se estima que a  $70^{\circ}\text{C}$  durante 2 min se lograría una reducción de 6 unidades logarítmicas la carga del patógeno (CSIRO, 2010). El cálculo del valor de  $F$  está basado en la siguiente ecuación:

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{(T-T_{ref})}{z}} dt \quad (32)$$

Donde T (°C) es la temperatura medida en el punto frío al tiempo t durante el proceso,  $T_{ref}$  es la temperatura de referencia, que para el presente estudio es de 70 °C; y z es el valor z de la bacteria objetivo, que en este caso es de 7.5 °C para el patógeno vegetativo *Listeria monocytogenes* (Peng et al., 2017).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 3.1 SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS.

Las ecuaciones acopladas de energía y del campo electromagnético (Ec. 23 y 29) con sus condiciones iniciales y de contorno se resolvieron numéricamente por el Método de los Elementos Finitos (MEF), usando el software comercial COMSOL Multiphysics. La cantidad de elementos de la malla utilizada influenciará en la representación del modelo. En el presente trabajo se resolvió con 3263 nodos y 6214 elementos tetraédricos, utilizando un mallado diferencial del dominio considerando diferentes subdominios como el interior del horno, la guía de onda y el alimento (Fig. 5). Dentro del producto se incorporó un tamaño máximo de los elementos de 6 mm, teniendo en cuenta la longitud de onda de la radiación dentro del mismo. Se consideró el análisis de la propagación armónica para resolver la Ec. (23) mientras que el balance microscópico de energía Ec. (29) se resolvió por medio del módulo de transferencia de energía en estado transitorio. El modelo acoplado se resolvió utilizando el paquete de resolución BDF (Fórmula de derivación atrasada de múltiples etapas). Los cálculos tomaron 952s para alcanzar el tiempo final del proceso con el paquete de resolución utilizado. El software COMSOL estima los valores del campo eléctrico en cada posición del horno y dentro del alimento, la energía absorbida por el alimento y predice, además, los perfiles de temperatura dentro del alimento a cada paso de tiempo.

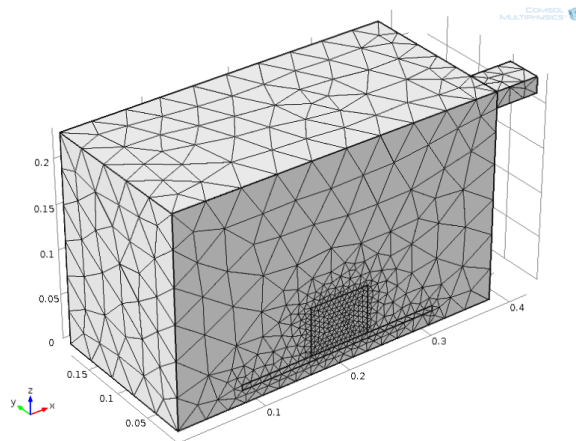


Figura 38. Mallado del dominio usado para las simulaciones electromagnéticas y de transferencia de calor en el software COMSOL Multiphysics.

Los parámetros y propiedades del alimento que se utilizaron para la simulación del modelo se encuentran en el cuadro 8:

Cuadro 8. Parámetros y variables utilizados en la simulación.

Parámetros/Variables	
To(°C)	23
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1051.68*
k (W/m °C)	0.58*
Cp (J/kg °C)	1220*
$\epsilon'$ (adimensional)	72.77**
$\epsilon''$ (adimensional)	20.08**
P (W)	1000
Tamaño del horno (m)	0.373x0.363x0.233
Tamaño de guía de onda (m)	0.05x0.078x0.018
Tamaño de la muestra (m)	Radio:.0335 Alto:0.06

\*De aplicación JAVA "Thermal properties"; \*\* (Komarov, 2012)

### 3.2 VALIDACIÓN DE SIMULACIÓN.

El modelo simulado fue validado contra valores experimentales de temperatura obtenidos en el laboratorio 16 de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de la FES Cuautitlán.

La figura 39 muestra el resultado de la simulación computacional utilizando el software COMSOL Multiphysics 4.3b, donde se puede visualizar la distribución de temperatura superficial 3D en el alimento y un corte de la distribución del campo eléctrico dentro del horno.

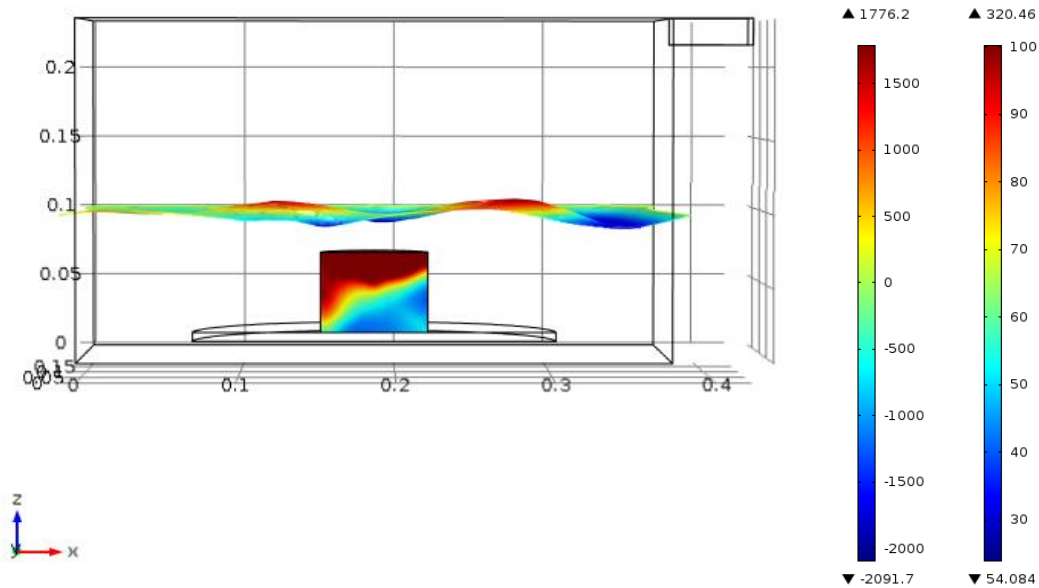


Figura 39. Perfil simulado de distribución de temperatura en la muestra y distribución del campo eléctrico del horno durante 190s de calentamiento con microondas.

En el caso de la distribución del campo eléctrico, puede observarse claramente la no uniformidad de este, siendo evidentes los picos y valles dando muestra de los máximos y mínimos correspondientes. El máximo del campo eléctrico dentro del horno (1776.2 V/m) se obtuvo en el cuadrante derecho (Fig. 39). Considerando la interacción del campo eléctrico generado por las microondas con el alimento, puede observarse la no uniformidad del calentamiento dentro de la muestra, ya que la parte izquierda del alimento tiene una mayor temperatura que la parte derecha, ya que se logra de 70 a los 100 °C, mientras la parte derecha de la muestra alcanza una temperatura que va desde los 50 a los 100 °C. Esto tiene coherencia con lo sucedido en la experimentación, puesto que después de un calentamiento de 30s, había un levantamiento por efecto de la evaporación de agua en esta zona, como se muestra en la figura 40.



Figura 40. “Levantamiento” en la zona izquierda de la muestra, debido a la evaporación de agua por la variada distribución de energía dentro del horno.

La simulación de la distribución de la temperatura muestra constantemente la ubicación de los puntos fríos y calientes dentro de los alimentos. Teniendo en cuenta la distribución de la temperatura dentro de la muestra, se puede observar que la superficie se calentó con mayor intensidad, alcanzando los 90 ° C después de 190 segundos de calentamiento mientras axialmente, el punto más frío se movió hacia los extremos inferiores del cilindro, alcanzando una temperatura de 40 ° C a 50 C. Después de 190 segundos, el centro y la superficie de la muestra alcanzaron la temperatura deseada, excepto en la parte inferior.

La temperatura máxima de simulación continúa aumentando por encima de los 100 °C, particularmente en la superficie de la muestra, mientras que la temperatura experimental máxima se mantiene en alrededor de 91 ° C, como se muestra en la Figura 11. Como no se consideró transferencia de masa o momento (pérdida de agua por evaporación) en el modelo físico, se espera que en algunos puntos del alimento alcance temperaturas por encima de 100°C.

Parte de la diferencia en el perfil experimental de temperatura transitoria podría atribuirse al retraso en la medición de la temperatura, desde el microondas hasta el termómetro.

La no uniformidad del calentamiento, se le puede atribuir a que en la simulación no fue considerada la rotación del plato, pero por lo reportado por Pitchai, et al. en el 2014, en el trabajo en el que simularon un calentamiento en un horno de microondas doméstico considerando la rotación del plato, aún persistía dicha no uniformidad de calentamiento

### 3.3 COMPARACIÓN DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA.

Tras conocer el punto frío de la muestra, gracias a la simulación de distribución de temperatura, se procede a validar el modelo de simulación mediante experimentos de calentamiento en tres distintas locaciones: superficie, centro y fondo dentro del alimento, como se muestra en la figura 41:

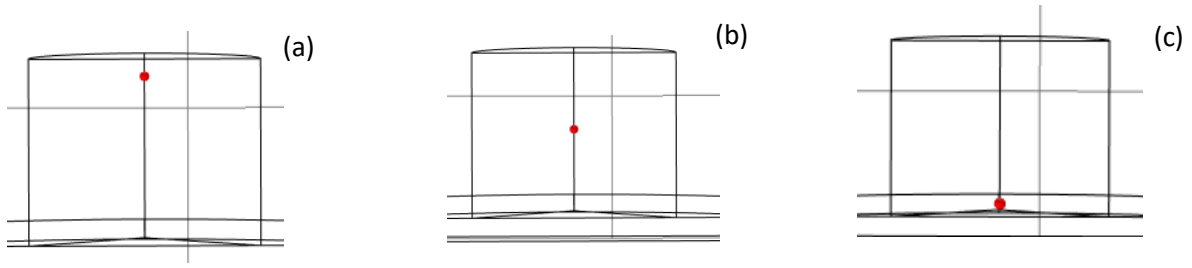


Figura 41. Posiciones en donde fueron medidas las temperaturas. (a)Superficie, (b)Centro, (c)Fondo.

El perfil de temperatura experimental en la superficie muestra un comportamiento sigmoïdal (Figura 42a) debido a la evaporación del agua dentro del alimento (Pitchai; et al, 2014).

Los perfiles simulados de temperatura transitoria mostraron un efecto de cambio de fase en su tendencia similar a los perfiles experimentales. Esto indica que la física de microondas y las técnicas de solución implementadas en el modelo fueron correctas. Hubo caídas en los perfiles de temperatura simulados en la mayoría de los lugares. La primera causa del efecto de ondulación se debe a la variación de las intensidades del campo electromagnético dentro de la cavidad (Pitchai; et al, 2014).

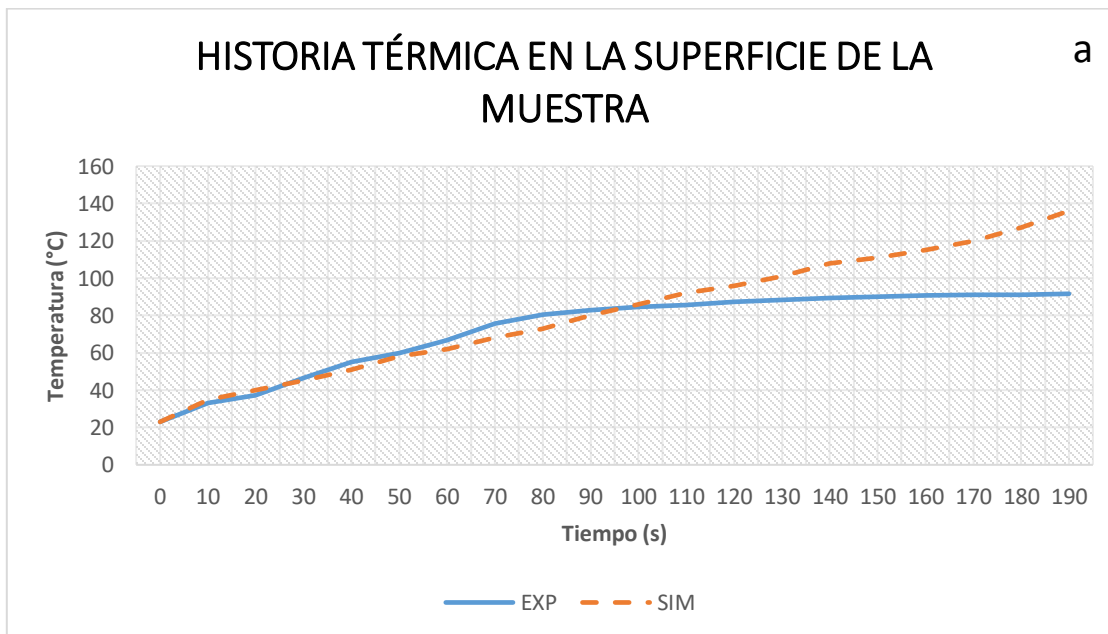
La raíz cuadrada del error (RMSE) fue calculado usando el promedio de los datos experimentales de los perfiles de temperatura dependientes del tiempo comparando el promedio de los datos simulados de cada punto de medición. Los valores calculados del RMSE están dados en cuadro 9:



Cuadro 9. Valores del error de la raíz cuadrada, respecto a los valores simulados con los experimentales

	Fondo	Centro	Superficie
<b>RMSE</b>	20.11	3.02	12.52
<b>(°C)</b>			

Los valores del error varían de 3.02 °C a 20.11 °C. Al centro de la muestra es donde mejor funciona la simulación teniendo un valor de RMSE de 3.02 °C, así mismo se observa que en la superficie el perfil simulado concuerda con el experimental hasta los 100 segundos, sin embargo, a partir de este punto el perfil simulado continua por arriba de los 100 °C debido a que no se consideran ecuaciones de transferencia de masa en la matemática de la simulación. El punto en donde se observa una mayor discrepancia entre los perfiles de temperatura experimental y simulados es en el fondo de la muestra, obteniendo un valor RMSE de 20.11 °C. Uno de los más grandes problemas en la experimentación, ya que un ligero cambio en la locación de la prueba resulta en un cambio de la medición de la temperatura. Incluso puede afectar el no considerar en la simulación el vidrio del vaso que contenía el alimento.



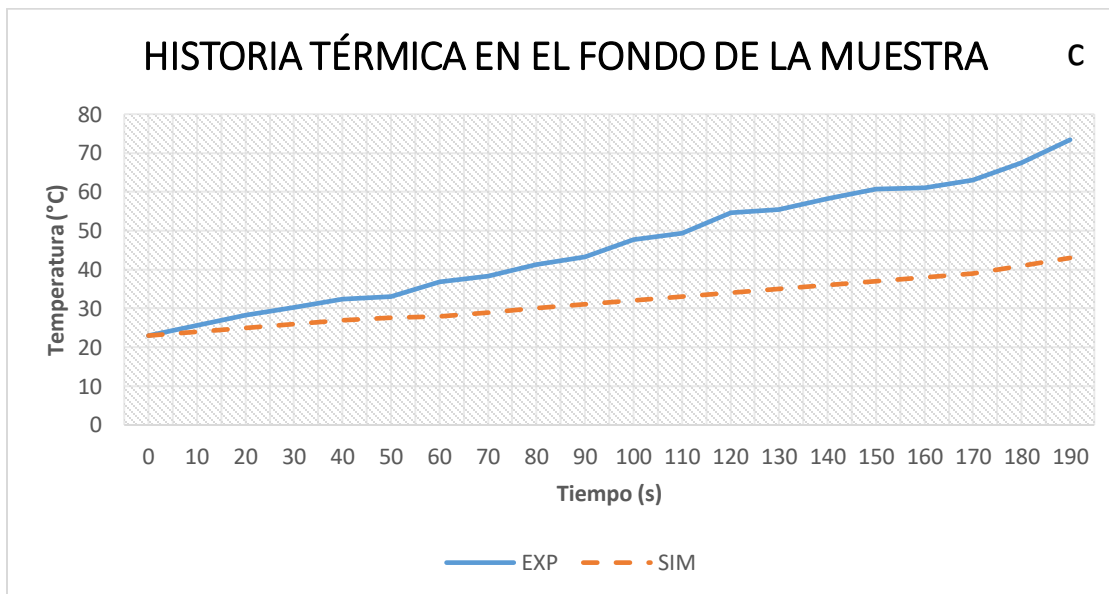
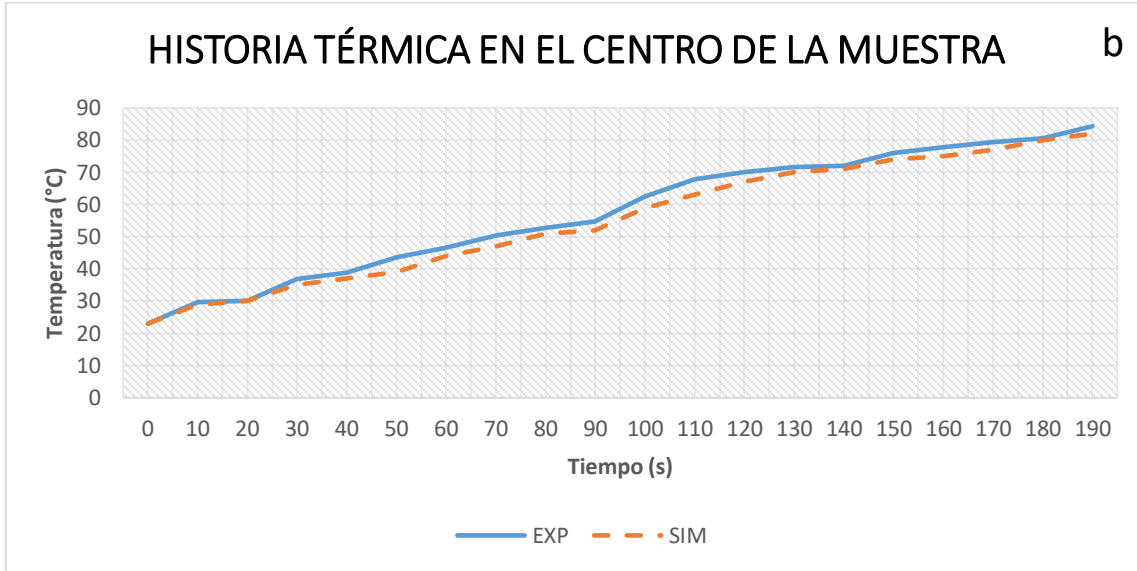


Figura 42. Simulación y perfiles de temperatura experimentales en a) la superficie b) centro y c) fondo de la muestra sometida a un calentamiento de 190 s en un horno de microondas de 1000 W

### 3.4 INTEGRACIÓN DE UN MODELO DE INACTIVACIÓN MICROBIANA.

Los productos a base de zanahoria deben ser sometidos a un paso de cocción o procesamiento adecuado para lograr al menos una reducción de 6D de *L*.

*monocytogenes* (CSIRO, 2010). El tiempo requerido para lograr una reducción mayor de 6 log de este patógeno fue de 30 s.

Debido al calentamiento no uniforme que se mantuvo en el alimento después del calentamiento con microondas, es importante validar la temperatura desde el punto de vista microbiano en función de las coordenadas espaciales. Según los resultados de la experimentación, se logró alcanzar la temperatura deseada en el punto frío de la muestra:

$$F_0 = \int_0^{3.16} 10^{\frac{(73.4-70)}{7.5}} dt$$

obteniendo un  $F_0 = 8.97$  minutos lo que según los reportado por CSIRO Food and Nutritional Science en 2010 se requiere un valor de F de al menos 2 minutos para la inactivación de 6D de la bacteria *L. monocytogenes*. Por lo que se puede establecer que se ha logrado la inocuidad del alimento.

La figura 43 compara el tiempo necesario para lograr la reducción 6 log en la muestra de papilla de zanahoria. Aunque la simulación predice la temperatura en comparación con el perfil experimental, la tasa de letalidad del perfil experimental de temperatura transitoria es más rápida debido a la tendencia del perfil (curva sigmoideal) (Peng et al., 2017). Los resultados de la simulación mostraron que el tiempo requerido para lograr la reducción 6D o 6 log de *Listeria monocytogenes* fueron en el centro de 130 s y en la superficie de 90 s mientras que en el fondo alcanza una temperatura de 45 °C por lo que el tiempo para lograr la reducción de microorganismos en el alimento es infinito. El experimento indicó que tomó 190 s en el fondo, 120 s en el centro y 70 s en la superficie. Por lo tanto, la predicción de simulación en términos de nivel de reducción microbiana estuvo bien al centro y superficie de la muestra de acuerdo con las condiciones del experimento.

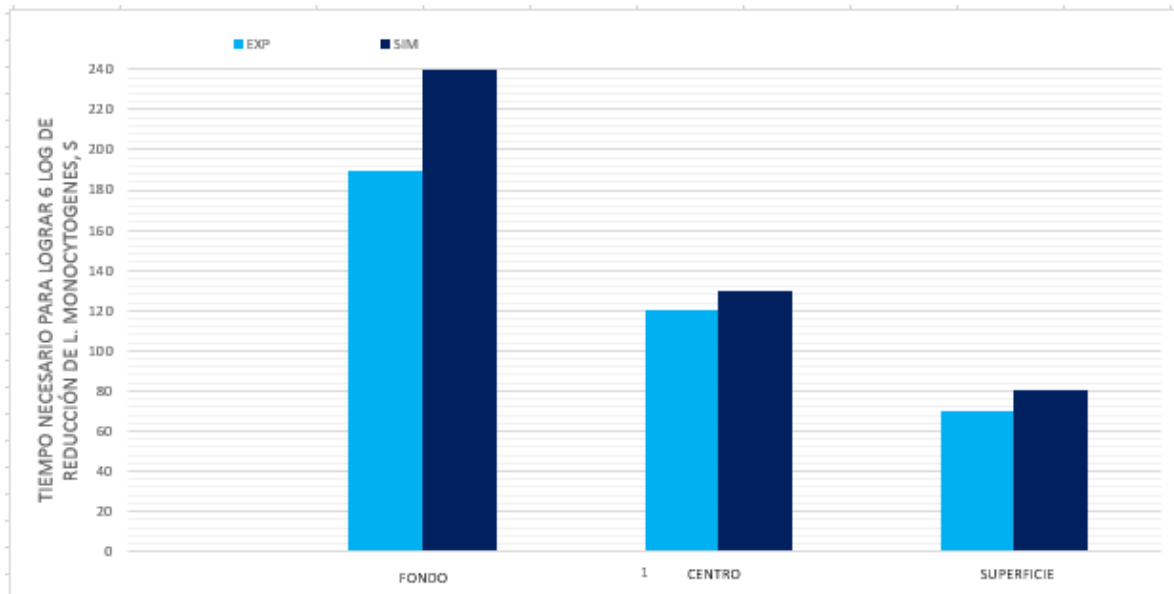


Figura 43. Comparación del tiempo necesario para lograr una reducción de 6 log de *L. monocytogenes* calculada a partir del perfil de temperatura y tiempo simulado y experimental de una papilla de zanahoria sometida a un calentamiento de 190 s en un horno de microondas de 1000 W.

## CONCLUSIONES.

Se desarrolló un modelo que predice la distribución de energía absorbida por la papilla de zanahoria y los perfiles de temperatura dependientes del tiempo, considerando una frecuencia de 2.45 GHz. Además de predecir la interacción que hay entre el campo electromagnético y la cavidad del horno.

La simulación, se ha encontrado que trabaja de manera bastante aceptable, ya que la predicción de distribución de temperatura se acerca de buena forma a la realidad en la superficie y centro de la muestra. La raíz cuadrada del error (RMSE) varía de 3.02 a 20.11 °C entre el modelo simulado y el experimental.

Los perfiles de temperatura pronosticados y experimentales se proporcionaron como entradas para un modelo de cinética de inactivación microbiana para *L. monocytogenes* para evaluar la seguridad alimentaria de una papilla de zanahoria calentada por microondas. Pueden usarse modelos de este tipo pueden ser usados para diseñar, optimizar y demostrar la seguridad de procesos similares para la industria y organizaciones regulatorias.

## RECOMENDACIONES.

En el caso de la simulación, sería un ejercicio interesante considerar el efecto del ángulo de rotación en la predicción de la transferencia de energía, ya que este puede ser un factor determinante para obtener una distribución homogénea de temperatura en la muestra y así evitar puntos fríos; alcanzando la temperatura de inactivación del microorganismo blanco.

Para el presente estudio de simulación, el software COMSOL no integra ecuaciones de transferencia de humedad; por lo que se recomienda utilizar o acoplar un segundo software, que si lo integre para obtener una simulación más cercano a la real, aunque cabe mencionar, que pese a esto el programa realiza una simulación bastante cercana a lo experimental.

Para una toma de temperatura más estricta, se recomienda utilizar termómetros con sensores de fibra óptica, que son aptos para hornos de microondas, para no perder calor al sacar la muestra y medir.

Para una comparación en la distribución de temperatura simulado contra una experimental como lo muestra la Figura 39, es recomendable utilizar una cámara infrarroja que, a partir de las emisiones de estas radiaciones del espectro electromagnético de la muestra, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano, tal como lo hace Akarapu, et al. en 2004.

Por otro lado, otro ejercicio interesante sería el de estudiar la composición química antes y después del calentamiento por microondas, mediante métodos analíticos y/o colorímetros para establecer la seguridad del proceso y demostrar la integridad de las propiedades del producto.

## ANEXOS.

Cuadro 1. Nomenclatura

<b>Variable</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidades</b>
<b>E</b>	Campo eléctrico	V/m
<b><math>\mu</math></b>	Permeabilidad	H/m
<b><math>\epsilon_0</math></b>	Permitividad en espacio libre	$8.854 \times 10^{-12}$ F/m
<b><math>\epsilon^*</math></b>	Permitividad dieléctrica compleja	Adimensional
<b>H</b>	Campo magnético	A/m
<b><math>P_v</math></b>	Densidad del poder disipado	$W/m^3$
<b><math>f</math></b>	Frecuencia	Hz
<b><math>\epsilon</math></b>	Constante dieléctrica	Adimensional
<b><math>\epsilon''</math></b>	Factor de pérdidas dieléctricas	Adimensional
<b><math>\sigma</math></b>	Conductividad eléctrica	S/m
<b><math>\rho</math></b>	Densidad	$Kg/m^3$
<b><math>C_p</math></b>	Calor específico a presión constante	J/g °C
<b><math>k</math></b>	Conductividad térmica	W/m °C
<b><math>T</math></b>	Temperatura	°C
<b><math>h</math></b>	Coficiente convectivo de transferencia de calor	$W/ m^2 / ^\circ C$

Cuadro 2. Historia térmica

CALENTAMIENTO EN MICROONDAS						
TEMPERATURA (°C)						
TIEMPO (s)	FONDO		CENTRO		SUPERFICIE	
	EXP	SIM	EXP	SIM	EXP	SIM
0	23	23	23	23	23	23
10	25.6	24	29.6	29	33.2	35
20	28.2	25	30	30	37.2	40
30	30.3	26	36.8	35	46.6	45
40	32.4	27	38.8	37	55	51
50	33	27.6	43.6	39	60	58
60	36.9	28	46.5	44	66.8	62
70	38.3	29	50.3	47	75.6	68
80	41.2	30	52.7	51	80.4	73
90	43.2	31	54.8	52	82.8	80
100	47.7	32	62.4	59	84.5	86
110	49.4	33	67.8	63	85.7	92
120	54.6	34	70	67	87.3	96
130	55.4	35	71.7	70	88.2	101
140	58.3	36	72	71	89.2	108
150	60.7	37	76	74	90	111
160	61	38	77.7	75	90.6	115
170	63	39	79.3	77	90.9	120
180	67.5	41	80.6	80	91.2	127
190	73.4	43	84.3	82	91.6	136

PROMEDIO					
FONDO		CENTRO		SUPERFICIE	
EXP	SIM	EXP	SIM	EXP	SIM
46.155	31.93	57.395	55.25	72.49	81.35



## MEDICIÓN DE EXACTITUD DEL MODELO.

El perfil de temperaturas simulado se comparó con el promedio del perfil de temperaturas experimental mediante la siguiente ecuación:

- En el fondo

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (31.93 - 46.15)^2}$$

- En el centro

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (55.25 - 57.39)^2}$$

- En la superficie

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (81.35 - 72.49)^2}$$

## REFERENCIAS.

- Acacio-Chirino, J., Zumalacárregui-de-Cárdenas, M., Almera-Medina, J., Barreno-Medina, D., Betancourt-Betancourt, R., & Araujo-Blanco, J. (2013). Desarrollo de un procedimiento para la extracción de  $\beta$ -caroteno y glicerol a partir de la microalga *Dunaliella* sp. en la salina Las Cumaraguas. *Revista Cubana de Química*, 214-228.
- Akarapu, R., Li, B., Huo, Y., & Liu, J. T. (2004). Integrated Modeling of Microwave Food Processing and Comparison with Experimental measurements. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 153-165.
- Akterian, S. (1994). Numerical simulation of unsteady heat conduction in arbitrary shaped canned foods during sterilization processes. *Journal of Food Engineering*, 21, 343-354.
- Al-Baali, A. G., & Mohammed, F. (2006). *STERILIZATION OF FOOD IN RETORT POUCHES*. (G. V. Barbosa-Cánovas, Ed.) New York: Springer.
- Andrew, G. (6 de Marzo de 2013). *COMSOL*. Obtenido de <https://www.comsol.com/blogs/what-is-comsol-multiphysics/>
- Anónimo. (1998). *Report of the food and drug administration: 21 Code of Federal Regulations parts 102, 110, 113 and 114*. National Recors Administration (USA). Obtenido de <http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/>.
- Arballo, J., Campañone, L., & Mascheroni, R. (2013). Análisis de perfiles de temperatura durante el proceso de calentamiento de frutas por microondas. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional.*, 1393-1407.
- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Refrigeration Handbook (SI)*.
- Awuah, G. B., Ramaswamy, H., & Economides, A. (2007). Thermal processing and quality: Principles and overview. *ELSEVIER*, 584-602.
- BADUI DERGAL, S. (2006). *Química de los alimentos*. . Ciudad de México, México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Banga, J., Alonso, A., Gallardo, J., & Perez-Martin, R. (1993). Mathematical modeling and simulation of the thermal processing of anisotropic and non-homogeneous conduction-heated canned foods: Application to canned tuna. *Journal of Food Engineering*, 18., 369-387.
- Barbosa-Canovas, G., Ma, L., & Barletta, B. (1997). Food engineering laboratory manual. *Technomic*.
- Basak, T., & Ayappa, K. (1997). Analysis of microwave thawing of slabs with effective heat capacity method. *AIChE Journal*, 1662-1674.
- Cano Montiel, A. (2008). Uso de microondas para el calentamiento de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos 2.*, 58-65.

- Casolari, A. (1996). Sterilizzazione: principi e applicazioni. (O. F, Ed.) *Microbiologia dei Prodotti di Origine Vegetale – Ecologia ed Analisi Microbiologica*.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing—A review. *Journal of food engineering*, 246-261.
- COMSOL. (2013). Microwave Oven. *models.rf.microwave\_oven*, 5-13.
- Constantinides, A., & Mostoufi, N. (1999). Numerical Methods for Chemical Engineers with Matlab Applications. *Prentice-Hall*.
- CSIRO, F. a. (2010). *Make it Safe: A Guide to Food Safety*. Collingwood: CSIRO Publishing.
- Datta, A. T., & Manson, J. (1986). Computer based retort control logic for on-line correction process deviations. *Journal of Food Science*, 51, 480-483.
- Datta, A., & Davidson, P. (2003). Microwave and radio frequency processing. *Journal of Food Science*, 32-41.
- Datta, A., & Teixeira, A. (1987). Numerical modeling of natural convection heating in canned liquid foods. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*, 1542–1551.
- Dev, S., Raghavan, G., & Garipey, Y. (2008). Dielectric properties of egg components and microwave heating for in-shell pasteurization of eggs. *Journal of food engineering*, 207-214.
- Dincer, I., Varlik, C., & Gun, H. (1993). Heat transfer rate variation in a canned food during sterilization. *International Comm. Heat Mass Transfer*, 20, 301-309.
- Dinčov, D., Parrott, K., & Pericleous, K. (2004). Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating. *Journal Food Engineering*, 403-412.
- Fellows, P. (1996). Food processing technology (principles and practice). *Woodhead Publishing Series in Food Science and Technology*.
- Gaze, J., & Brown, G. (1990). Determination of the Heat Resistance of a Strain of Non-proteolytic Clostridium Botulinum Type B and a Strain of Type E, Heated in Cod and Carrot Homogenate over the Temperature Range 70 to 92 °C. *Campden Food and Drink Research Association Technical Memorandum*.
- Gebhardt, S., & R.G, T. (2002). *Nutritive Value of Foods*. Beltsville, Maryland: USDA.
- Goldbith, S., & Wang, D. (1967). Effect of microwaves on Escherichia coli and Bacillus subtilis. *Applied and Environmental Microbiology*, 1371.
- GPO. (14 de 01 de 2014). *Code of federal regulations*. Obtenido de Title 21. Chapter 1. Subchapter B. Part 114-Acidified Foods: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2013-title21-vol2/pdf/CFR-2013-title21-vol2-part114.pdf>
- Halkman Dogan, H., & Yücel, P. (2014). Microwave. *Non-thermal processing*. Saraykoy, Ankara, Saraykoy Nuclear Research and Training Center, Turkey: Encyclopedia of Food Microbiology, Volume 2.

- Hammid-Samini, M., & Swartzel, K. (1984). Pasteurization design criteria for production of extended shel-life refrigeration liquid whole egg. *Food Proc. Preserv.*
- Harper, W. (1976). *Diary Technology and Engineering*. (C. Hall, Ed.) Connecticut, Westport.
- Hayakawa, K. (1997). Mathematical methods for estimating proper thermal processes and their computer implemetation. *Advances in Food Resercha*, vol. 23, Academic Press, 75.
- Heldman, R., & Hartel, D. (1997). Principles of food processing. *Chapman & Hall*.
- Holdsworth. (1997). Thermal Processing of Packaged Foods. *Blackie Academic & Professional*.
- Holman, J. (1998). Transferencia de calor. Madrid, España: McGrawHill, 8va ed.
- Karel, M., Fennema, O., & Lund, D. (1975). Principles of food science, Part II. *Marcel Dekker*.
- Knoerzer, K., & Regier, M. (2008). A computational model for calculating temperature distributions in. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 374-384.
- Komarov. (2012). *Handbook of Dielectric and Thermal properties of materials at microwave frequencies*. Moscu, Rusia.
- Kozempel, M., Annous, B., Cook, R., & Scullen, O. &. (1998). Inactivation of microorganism with microwaves at reduced temperatures. *Journal of food Protection*, 582-585.
- Lanoiselle, J., Candau, Y., & Debray, E. (1986). Predicting internal temperature of canned food during thermal processing using a linear recursive model. *Journal of Food Science*, 60(3), 715-719.
- Larousse, J., & Brown, B. (1997). Food canning technology. *Wiley-VCH Inc*.
- Lau, M., & Tang, J. (2002). Pasteurization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves. *Journal of Food Engineering* 51, 283-290.
- Lewis, m. j., Neil, h., & Barbosa-Cánovas, g. (2000). Continuous Thermal Processing of Foods: Pasteurization and UHT Sterilization,. *Springer*.
- López, H. (2015). LAS ONDAS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EXTRAORDINARIA FUERZA INVISIBLE. *Ciencia Unemi*, 1(2), 26-29.
- Lund, D. (1977). Maximising nutrient retention. *Food Technology*, 71-80.
- Maurer, L., & Ozen, B. (2004). Food processing: principles and applications. (H. Y. Scott Smith J, Ed.) *Food Packaging*.
- Metaxas, A. C. (1996). Foundations of electroheat. *Chicester: J. Wiley & Sons*.
- Michael, D., Mings, P., & Baghrust, R. (1997). Aplicaciones de microwave dielectric heating effects of synthetic problems in chemistry. En H. y. Kingston (Ed.), *Microwave-Enhanced Chemistry*. (págs. 1-54). Washington, D.C, EE UU: Library of Congress Cataloging in Publication Data.

- Monroe, R., Etchells, J., Pacilio, J., Borg, A., Wallace, D., Rogers, M., . . . & Schoene, E. (1969). Influence of various acidities and pasteurization temperatures on the keeping quality of fresh-pack dill pickles. *Food Technology*, 71-77.
- Montanari, A., Barone, C., Barone, M., & Santangelo, A. (2018). Thermal Treatments of Canned Foods. (S. Parisi, Ed.) *Chemistry of foods*, 1.
- NACMCF., N. A. (2006). Requisite scientific parameters for establishing the equivalence of alternative methods of pasteurization. *J. Food Prot.*(69), 1190-1216.
- Nations, F. a. (1991). Necesidades de vitamina A, hierro, folato y vitamina B12: informe de una Consulta Mixta FAO/OMS de Expertos. En F. & Org. (Ed.).
- Ni, H., & Datta, A. (2002). Moisture as related to heating uniformity in microwave processing of solids foods. *Journal of Food Process Engineering*, 367-382.
- Oey, I., Van der Plancken, I., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2008). Does high pressure processing influence nutritional aspects of plant based food systems? *Trends in Food Science and Technology*, 300-308.
- Peleg, M., Normand, M., & Corradini, M. (2005). Generating microbial survival curves during thermal processing in real time. *J Appl Microbiol*, 406-417. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2004.02487.x>
- Peng, J., Tang, J., Barret, D., Sablani, S., & Powers, J. (2014). Kinetics of carrot texture degradation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 84-91.
- Peng, J., Tang, J., Barrett, D., Sablani, S., Anderson, N., & Powers, J. (2017). Thermal pasteurization of ready-to-eat foods and vegetables: Critical factors for process design and effects on quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2970-2995. doi:10.1080/10408398.2015.1082126
- Pflug, I., Holcomb, R., & Gómez, M. (2001). Principles of the thermal destruction of microorganisms. *Disinfection, sterilization, and preservation*.
- Pitchai, K., Birla, S., Subbiah, J., Jones, D., & Thippareddi, H. (2012). Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in microwave ovens. *Journal of Food Engineering*, 100-111.
- Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., González, R., Jones, D., & Subbiah, J. (2014). A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: Development and validation. *Journal of Food Engineering*, 60-71.
- Richardson, P. (2001). *Thermal Technologies in Food Processing*,. CRC Press.
- Salazar-González, C., San Martín González, M., López Malo, A., & Sosa Morales, M. (2012). Recent studies related to microwave processing of fluid foods. *Food Bioprocess and Technology*, 5, 31-46.
- Scalbert, A. & (2000). Dietary intake and bioavailability of polyphenols. Chocolate: Modern science investigates an ancient medicine. *Journal of Nutrition*, 2073S-2085S.

- Schlegel, W. (1992). Commercial pasteurization and sterilization of food products using microwave technology. *Food Technology*, 62-63.
- Shenga, E., Singh, R., & Yadav, A. (2010). Effect of pasteurization of shell egg on its quality characteristics under ambient storage. *Journal of food science and Technology-Mysore*, 47, 420-425.
- Silva, C., Hendrickx, M., Oliveira, F., & Tobback, P. (1992). Optimal sterilization temperatures for conduction heating foods considering finite surface heat transfer coefficients. *Journal of Food Science*, 743–748.
- Silva, F. V., & Gibbs, P. A. (2012). Thermal pasteurization requirements for the inactivation of Salmonella in foods. *Food Res. Int.*(45), 695-699.
- Silva, F. V., Gibbs, P. A., Nunez, H., Almonacid, S., & Simpson, R. (2014). Thermal Processes: Pasteurization. *Encyclopedia of Food Microbiology, 2nd edition*, 577-595.
- Stoforos, N., & Merson, R. (1990). Estimation heat transfer coefficients in liquid/particulate canned food using only liquid temperature data. *Journal of Food Science*, 478.
- Tong, C., & Lund, D. (1993). Microwave heating of baked dough products with simultaneous heat and moisture transfer. *Journal of Food Engineering*, 319-339.
- Tucker, G. (1991). Development and use of numerical techniques for improved thermal process calculations and control. *Food Control*, 15-19.
- Verboven, P., Datta, A., Anh, N., Scheerlinck, N., & Nicolai, B. (2003). Computation of airflow effects on heat and mass transfer in a microwave oven. *Journal of Food Engineering*, 181-190.
- Vervoot, L., Van der Plancken, I., Grauwet, T., Verlinde, T., Matser, A., Hendrickx, M., & Van Loey, A. (2012). Thermal versus high pressure processing of carrots: a comparative pilot-scale study on equivalent basis. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 15, 1-13.
- Yam, K., & Papadakis, S. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *J. Food Eng.* 61, 137-142.
- Zhang, H., & Datta, A. (2003). Microwave power absorption in single-and multiple-items foods. *Food and Bioproducts Processing*(81), 257-265.
- Zukauskas, R. (2016). Carrot. *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2.