



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

“Simulación computacional del descongelado de  
brócoli por microondas empleando el método  
numérico de elementos finitos.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

CARLOS ZÁRATE MARTÍNEZ

ASESOR: Dra. María Elena Vargas Ugalde

COASESOR: I.A. Francisco Javier López Martínez

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



Dedicatorias.

A mi familia:

A mi madre, Rosy, que su luz y amor son la brújula que me guía. Gracias por darme el apoyo y cariño para lograr mis metas; por todos los desvelos y lecciones que me inspiraron a siempre dar lo mejor de mí.

A mi padre, Carlos, cuyo ejemplo es el motor que me da coraje cuando me detiene la duda. Gracias por enseñarme a siempre poner a la familia ante todo, a apuntar alto y a nunca dejar de creer en mí.

A mis hermanos David y Frida; llegaron para enseñarme a ser una mejor persona. Gracias por todo el apoyo, el cariño, las risas y los pleitos que llenan mi vida de color.

A mis tíos Pepe, Gabriel, Luz María, Ramiro, Pili, Rosalba, Ricky y Tabo, gracias por cuidarme con tanto cariño y por tan buenos momentos, pasados y futuros. A mis primos Gaby, Fernando, Ricky, Alex M, Alex G, Max, Karen, Karina, Renata, Alex R, Samantha y Oliver, a quienes admiro y quiero mucho. A mi abuela Martha por darme, desde que tengo memoria, felicidad con su cariño y apoyo incondicional, siempre deseando que logre todos mis sueños. A mis abuelos Willy y Lucha que fueron un regalo para mí dándome tantos buenos recuerdos, siempre los tengo en mi corazón y en mi mente.

A mis maestros, La doctora María Elena Vargas, la profesora Julieta González y el profesor Paco López por su disposición, consejos y apoyo en asesorar esta tesis. A la memoria del profesor Victor Manuel Avalos; su pasión por la docencia y su empeño en formar profesionales de alto nivel fueron una inspiración para poner en alto el nombre de mi carrera.

A mis amigos Saul y Villa; el mejor equipo de trabajo y la mejor amistad que nunca hubiera imaginado tener. Fue un placer superar hombro con hombro las adversidades y disfrutar las recompensas.

## Índice

Resumen	1
Introducción	3
I. Antecedentes	7
1.1. Generalidades del brócoli	7
1.2. Congelación y descongelación	12
1.3. Transferencia de calor por conducción	17
1.4. Modelamiento de un proceso de descongelado	19
1.5. Método de Elementos Finitos (MEF)	21
1. 6. Transferencia de calor por radiación	25
1.6.1. Calentamiento por microondas	26
1.6.2. Componentes principales de horno de microondas	28
1.6.3. Mecanismos de calentamiento por microondas en alimentos.	30
1.6.4. Leyes de la Radiación	32
II. Metodología Experimental	35
2. 1. Objetivo general	35
2.1.1. Objetivo particular 1	35
2.1.2. Objetivo particular 2	35
2.1.3. Objetivo particular 3	36
2.2. Materiales	36

2.3. Métodos	36
2.3.1. Determinación de poli-fenoles totales	37
2.3.2. Desarrollo de simulación	39
2.3.2.1. Estrategia de modelamiento	40
2.3.2.2. Electromagnetismo	45
2.3.2.3. Conservación de energía	49
2.3.2.4. Condiciones Frontera	50
2.3.3. Modelo de validación	54
III. Análisis de resultados	56
Conclusiones	66
Recomendaciones	67
Referencias	68
Anexo 1.	76
Cálculo de propiedades térmicas de brócoli congelado.	76
Anexo 2.	79
Cálculo de propiedades dieléctricas de brócoli congelado.	79

## Índice de Figuras

Figura 1. Etapas de la congelación de una gota de agua	14
Figura 2. Etapas de congelación de un cuerpo de agua y de un alimento sólido	16
Figura 3. Partición del dominio de la elipse " $\frac{x^2}{4} + y^2 = 1$ " en elementos triangulares	22
Figura 4. Aproximación de elementos finitos a la solución de la ecuación diferencial de una elipse.	24
Figura 5. Espectro electromagnético	28
Figura 6. Horno de microondas y sus componentes	29
Figura 7. Mecanismo de acción del reactivo Folin-Ciocolteau	37
Figura 8. Ejemplo de curva patrón de Ácido Gálico	39
Figura 9. Selección de dimensiones del modelo a 3D	40
Figura 10. Selección del fenómeno del proceso de calentamiento por microondas	41
Figura 11. Selección de tipo de estudio de Frecuencia transitoria	42
Figura 12. Asignación de valores de los parámetros para todos los componentes físicos en la simulación	43
Figura 13. Definición de geometría de los componentes de la simulación	43



Figura 14. Esquema de corte de horno de microondas. Partes: (a) muestra de brócoli, (b) plato de vidrio, (c)cavidad de resonancia, (d) guía de ondas	44
Figura15. Definición de propiedades termo-físicas y dieléctricas del alimento	45
Figura 16. Posición del guía de onda modo TE <sub>10</sub> rectangular	47
Figura 17. Mallado del dominio para la simulación electromagnética y de transferencia de calor	53
Figura 18. Lectura de temperaturas en las diferentes posiciones de la muestra. (a) Centro, (b) Superficie & (c) Lateral	54
Figuras 19a) vista de planta de muestra. 19b) vista de elevación de muestra. 19c) calentamiento de muestra para validación de simulación	55
Figura 20. Perfiles de temperatura superficial de la muestra y distribución de campo eléctrico durante 30s de calentamiento con microondas (visualización de la mitad del horno)	57
Figura 21. Gráfica de Historia térmica obtenida con la simulación computacional	58
Figura 22. Gráfica de Historia térmica de 3 puntos de muestra de brócoli obtenida experimentalmente	59

Figura 23. Gráfica de comparación de historias térmicas simulada y experimental de la superficie de la muestra	60
Figura 24. Gráfica de comparación de historias térmicas simulada y experimental del lateral de la muestra	61
Figura 25. Gráfica de comparación de historias térmicas simulada y experimental de centro de muestra	61
Figura 26. Curva patrón de Acido gálico	64
Figura 27. Aplicación para el cálculo de propiedades térmicas de alimentos	78

## Índice de Cuadros

Cuadro 1. Composición química y propiedades térmicas de brócoli descongelado	8
Cuadro 2. Error relativo de la simulación en 3 puntos de la muestra	62
Cuadro 3. Comparativo de concentración de polifenoles totales con diferentes métodos de descongelado	65
Cuadro 4. Modelos de propiedades térmicas de componentes de alimentos	78
Cuadro 5. Modelo para el cálculo de propiedades dieléctricas para brócoli congelado comercial	80

## **Resumen**

En este trabajo se estudiaron los efectos de la descongelación por microondas de brócoli, alimento rico en tener compuestos antioxidantes y anticancerígenos sensibles a las altas temperaturas y que suele ser congelado y empaquetado en trozos para su comercialización a gran escala, por lo que se desarrolló una simulación computacional con un software comercial (Comsol Multiphysics) el cual utiliza un modelamiento matemático que resuelve la distribución de temperatura considerando la absorción de energía electromagnética dentro de un producto (brócoli) al ser calentado por microondas. Se definió la distribución del campo electromagnético utilizando las ecuaciones de Maxwell, las cuales gobiernan la propagación de radiación en un medio dieléctrico, que junto con ecuaciones de dinámica de transferencia de calor por conducción, permitieron predecir los perfiles de temperatura del producto y su tiempo efectivo de descongelación por microondas.

Se obtuvo predicciones cercanas a la historia térmica en 3 zonas (superficie superior, superficie lateral y centro) de una muestra de brócoli de 100 gr en forma de media esfera

como un tazón, durante un proceso de descongelación por microondas a 1000 W por 60 s; predicciones que fueron validadas con resultados experimentales en las mismas condiciones a las simuladas. En paralelo se estudió el efecto de este calentamiento por microondas en el contenido de compuestos fenólicos del brócoli con el método Folin-Ciocalteu de determinación de polifenoles totales por triplicado en muestras del alimento cada 10 segundos por un minuto de proceso. Los resultados de historia térmica más cercanos a los datos experimentales se obtuvieron en el centro del alimento. El contenido de polifenoles no presentó variación significativa al conseguir un descongelamiento correcto a tiempos cortos de procesos que no llegan a afectar estos compuestos termosensibles.

## **Introducción**

Los procesamientos térmicos son vitales para la industria de alimentos, siendo la mayor parte procesos de conservación y cocción que se basan en el calentamiento externo de los productos por periodos de tiempo largos y a temperaturas altas. Estos tratamientos pueden provocar degradaciones indeseables a compuestos termo-sensibles contenidos en los alimentos y reducir sus propiedades nutricionales. Así, existe un desafío constante en el desarrollo de avances en el procesamiento de alimentos que garantice las más alta calidad y seguridad de los productos (Analía & Zaritzky, 2010).

El estudio de un alimento como el brócoli y del proceso de descongelamiento que necesita aplicársele para su consumo comercial es de gran interés. El brócoli suele ser congelado y cortado en trozos para su comercio a gran escala, es rico en compuestos fenólicos y glucocilonatos (León, 2016) con propiedades antioxidantes y anticancerígenos, que son sensibles a las altas temperaturas, por lo que si el proceso de descongelado es mal ejecutado presentaría una disminución de estos compuestos funcionales. Así, se buscan métodos no

térmicos de descongelación que garanticen la calidad del alimento de manera eficiente y barata como una alternativa atractiva de proceso de descongelación.

El uso de tecnología de microondas es bien conocido en el ámbito doméstico para calentar y descongelar alimentos. A diferencia de los métodos convencionales, la energía de microondas puede ser encendida y apagada instantáneamente y no depende del contacto con superficies y/o algún medio caliente o electrodos. A nivel industrial se han desarrollado diversos equipos que han ampliado enormemente las posibilidades de aplicación de las microondas en operaciones como el secado, pasteurizado, esterilizado y freído, en gran medida, debido a que es ser un proceso de fácil operación, que presenta un efecto de calentamiento volumétrico del interior al exterior del alimento con una velocidad de calentamiento más rápida que los métodos convencionales, lo que da paso a tiempos de proceso menores y costos operativos bajos. Por estas cualidades los alimentos presentan pocos cambios organolépticos y nutricionales, así como una protección a la superficie contra pardeamientos o formación de costras al ser un calentamiento del interior al exterior (Bhattacharya & Basak, 2017).

El calentamiento por microondas es un proceso complejo, basándose en la conversión de energía electromagnética a energía calorífica, que ocurre cuando la onda electromagnética que penetra la superficie de los productos es convertida a energía térmica dentro del material (Cha-hum et al, 2011).

Para el estudio de esta tecnología, interés de este trabajo, se utiliza un modelamiento matemático que resuelva un sistema interconectado de ecuaciones de electrodinámica y conductividad de calor en estado estacionario. Dada la complejidad matemática de un modelo así, el cual se compone de ecuaciones derivadas parciales con o sin restricciones y con sus respectivos valores de contorno e iniciales donde interactúan procesos electromagnéticos y térmicos, se requiere de su resolución numérica, siendo necesarias técnicas de discretización habitualmente empleadas en problemas de transferencia de calor y momento llamadas: *métodos numéricos*.

De los métodos numéricos para la discretización de modelos matemáticos, diversos autores han utilizado el método de Elementos Finitos (MEF) en el modelamiento de descongelado por microondas en alimentos como pera

(Arballo et al, 2013), carne de res y puré de papa (Chen et al, 2016). Éste tiene como principio, convertir las ecuaciones diferenciales parciales del elemento, acotadas por las condiciones de frontera, en un sistema de ecuaciones algebraicas que al ser resuelto permita hallar una buena aproximación de la variable dependiente en cada una de las coordenadas espaciales de la región de interés. Alternativamente, los parámetros de la función de aproximación para cada uno de los elementos del dominio (Chen et al, 2016).

Para la implementación de estos métodos numéricos, resolver las ecuaciones análogamente es complicado y tardado, por lo que se han desarrollado variedad de softwares comerciales que disponen de módulos pre-configurados que permiten un rápido planteo y resolución numérica de métodos aplicados en simulaciones en 2 y 3 dimensiones de fenómenos físicos (Campañone y Zaritzky, 2012), por lo que estudiar modelos matemáticos viene con la razón: matemáticas + computación.



## **I. Antecedentes**

### **1.1. Generalidades del brócoli**

El brócoli, llamado así por la palabra italiana “Brocco” que se significa “brote”, que a su vez viene de la palabra “brazo” en latín, “brachium”, es un miembro de la familia de las coliflores. Esta planta crucífera tuvo su origen en Italia, esparciéndose al resto del mundo en los siglos XIX y XX hasta formar parte esencial en la dieta humana a nivel mundial (Dixon, 2008).

El brócoli ha llamado la atención, más que cualquier otra hortaliza en el mundo científico, debido a que el consumo de esta crucífera actúa en la prevención de enfermedades, principalmente en el cáncer de colon. Es por esto, que se le ha dado la propiedad de ser la “Hortaliza anticancerígena”. En el ámbito de la nutrición, el brócoli se destaca en la prevención de la anemia por su alto contenido de hierro y calcio, fitonutrientes y vitaminas C y E (Finley et al, 2001). En el cuadro 1 se presenta la composición y propiedades térmicas del brócoli.

**Cuadro 2. Composición química y propiedades térmicas de brócoli descongelado (Comstock & Owen, 2002)**

Humedad (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Cho's (%)	Fibra (%)	Cenizas (%)	Punto inicial de congelación (°C)	Cp $\left(\frac{kJ}{kg * K}\right)$	Calor latente $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$
90.69	2.98	0.35	5.24	3.00	0.92	-0.6	1.82	303

En 2016 representó el 8.7% de las exportaciones agroalimentarias. México es uno de los principales países exportadores de hortalizas frescas y congeladas hacia Estados Unidos. En ese marco, el brócoli ha tenido un auge importante. En los últimos treinta años, la superficie sembrada se incrementó a un ritmo de 13.8% (SAGARPA, 2011); en 2016, se cultivó en 17 estados de la república en 31,853 hectáreas. Los estados que destacan son: Guanajuato, Puebla, Michoacán, Jalisco, Sonora y Aguascalientes. El destino de las exportaciones es, principalmente, los Estados Unidos de América, Japón, República de Costa Rica y Canadá (SIAP, 2016). Las exportaciones fueron por \$61.05 millones de dólares.

El brócoli tiene una alta demanda de mano de obra para su cultivo y por los empleos generados en empresas procesadoras, distribuidoras, comercializadoras y exportadoras (Maldonado et al, 2017). La demanda de trabajadores es superior a la de otros cultivos, por ejemplo, el cultivo del brócoli requiere de 76 jornales, mientras el maíz 17.25 jornales en promedio por hectárea (SAGARPA-SIAP, 2010).

El mercado mundial de brócoli ha crecido en la última década, y no se prevé una disminución en la demanda, sino más bien, que el crecimiento se mantendría (Lourido & Garcés, 2010). Entre los principales factores de crecimiento de su demanda mundial se pueden citar:

- La marcada tendencia mundial hacia el consumo de productos naturales.
- Los beneficios de salud que se atribuyen al brócoli.
- Amplia aceptación de sabor y variedad de usos culinarios en los diferentes segmentos del mercado de alimentos.

Los segmentos del mercado se clasifican en:

- Brócoli Fresco.
- Brócoli pre-cocido y congelado IQF
- Brócoli Orgánico.

Siendo la línea principal de negocio la producción de brócoli congelado bajo tecnología IQF (Individual Quick Freezing) para exportación, que implementa los mejores equipos tecnológicos (Bisbicuz & Velez, 2015) para el procesamiento de productos alimenticios de muy alta calidad e inocuidad, basándose en la norma CODEX STAN 320-2015 de hortalizas congeladas. Esta norma define al producto a aquel que parte de tallos o vástagos frescos, limpios y sanos de la planta del brócoli, que han sido clasificados, recortados, lavados y escaldados suficientemente para lograr una estabilidad adecuada de color y sabor durante los ciclos normales de comercialización, sometido a un proceso de congelación de tal forma que la zona de temperatura de cristalización máxima se pase rápidamente y el cual no se considerará completado hasta que el producto no haya alcanzado una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  en el centro térmico.

Los estilos de brócoli congelado comercializado son:

a) Espigas: Cabeza y la parte adyacente del tallo, con o sin hojas tiernas ligadas, que varían en longitud de 7 cm a 16 cm. Las espigas pueden ser divididas longitudinalmente.

b) Floretes: la cabeza y la porción adyacente del tallo, con o sin hojas tiernas ligadas, que varían en longitud de 3 cm a 7 cm con un vástago suficiente para mantener una cabeza compacta. Los flósculos se pueden partir longitudinalmente.

c) Espigas cortadas: lanzas de la planta de brécol, que han sido cortadas en porciones y que pueden tener forma irregular. Piezas de 2 cm a 5 cm en la dimensión más larga. El material de hoja puede estar presente pero no debe exceder el 35 por ciento m / m y el material de la cabeza no debe ser menor de 15 por ciento m / m.

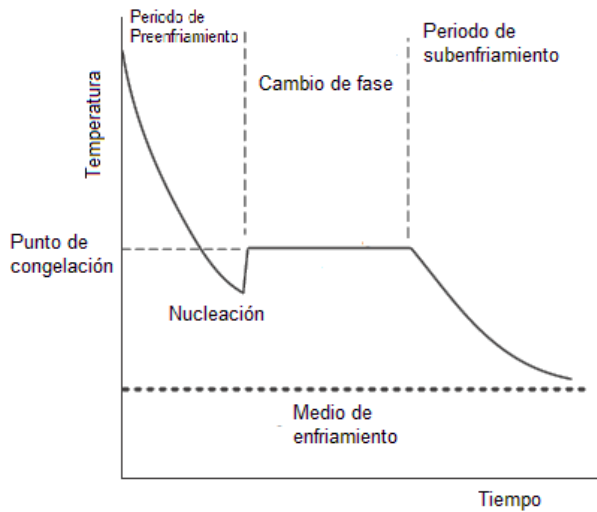
(d) Picado: Brócoli finamente cortado en trozos de menos de 2 cm. Partes de hoja pueden estar presentes pero no debe exceder el 35 por ciento m / m y el material de la cabeza no debe ser menor de 15% m / m (Codex alimentarius, 1981)

## 1.2. Congelación y descongelación

Entre las distintas tecnologías de conservación de alimentos, la congelación es una de las más difundidas, ya que los alimentos congelados pueden ser almacenados por largos períodos manteniendo prácticamente inalterada su calidad original. La congelación también es empleada para conservar materias primas o productos semiprosesados, los cuales sufren una etapa de descongelación a nivel industrial previa a la elaboración final (Ramirez y León, 2000).

El congelamiento y descongelamiento de alimentos sólidos son procesos similares y complejos que involucran diversos fenómenos físicos influenciados por factores ambientales (Pangrle et al, 2015). Cuando una gota de agua con una dimensión muy pequeña que tiene una temperatura homogénea a cualquier tiempo, es expuesta a un ambiente con una temperatura debajo de los 0°C, la única fuerza que evita que la gota se congele instantáneamente es la resistencia superficial a la transferencia de calor, que genera la conductividad térmica  $k\left[\frac{W}{m\cdot K}\right]$  del aire a su alrededor. Esta conductividad controla la velocidad con la cual el calor puede viajar de la

superficie de la gota al aire. La gota de agua cuenta con una temperatura superficial superior a la de su punto de congelación. Por un lapso se enfriará sin presentar congelamiento, un proceso conocido como “enfriamiento sensible”, un cambio de temperatura que puede ser medido con termómetro. Incluso cuando el punto de congelación es alcanzado, la gota continuará enfriando sin presentar un cambio de fase, esto es conocido como “superenfriamiento”. Sólo cuando se han alcanzado varios grados de superenfriamiento, ocurrirá una nucleación (aparición de una nueva fase estable) y un cambio de fase. Debido a que el congelamiento libera una gran cantidad de energía latente que tiene que ser transferida al ambiente, la temperatura de la gota se elevará al punto de congelación y se mantendrá constante por un tiempo, durante el cual el hielo y el agua coexistirán simultáneamente. Una vez que el cambio de fase se complete, la temperatura volverá a descender hasta que el hielo se equilibre con el ambiente externo (Fig. 1). Así la gota habrá pasado por tres etapas: Pre-enfriamiento, Cambio de fase y Sub-enfriamiento (Pham, 2014).



**Figura 1. Etapas de la congelación de una gota de agua (Pham, 2014)**

Si se considera una masa de agua más grande, la diferencia principal entre esta y la gota sería que, debido al tamaño del producto, se presentaría un perfil de temperaturas significativo en el cuerpo más grande, con la superficie siendo más fría que sus regiones interiores. Así, su “resistencia interna” a la transferencia de calor se vuelve un factor importante.

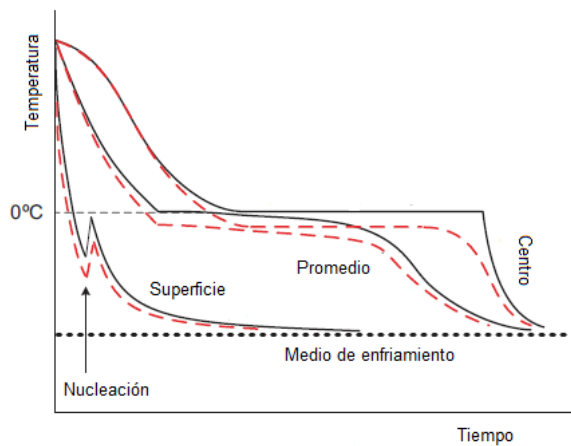
Tras un enfriamiento sensible y de un super-enfriamiento, la nucleación se presentará con un cambio de fase en la superficie y la temperatura superficial saltará rápidamente al punto de congelamiento.



Una capa de hielo se forma en la superficie engrosándose gradualmente. La interfase entre la región congelada y la no congelada es conocida como el “frente de congelación”. Ambas regiones continúan enfriándose conduciendo el calor del interior a la superficie, moviendo el frente de congelación cada vez más profundo en el producto. A no ser que se aplique un congelamiento extremadamente rápido o haya barreras físicas que impidan la cristalización, tales como películas plásticas o burbujas de aire, una vez que se haya alcanzado una nucleación en la superficie, la formación de cristales de hielo será el mecanismo principal de enfriamiento, al no ser ya el cambio de fase dependiente de una nucleación o un super-enfriamiento.

Una vez que el frente de congelación haya llegado al centro del producto el cambio de fase se habrá completado. Un enfriamiento sensible continuará hasta que el hielo se haya equilibrado con el ambiente. Cada región del producto habrá pasado a través de las tres etapas de congelación mencionadas a diferentes tiempos dependiendo de su distancia con la superficie (Figura 2), cruzando la superficie más rápido la temperatura de congelación, mientras el centro enfría a una temperatura

cercana a la del punto de congelamiento en un estado sin congelar por cierto tiempo. Debido a que el centro descongelado está rodeado por un frente de congelación cuya temperatura es el punto de congelación, cualquier punto en él, incluyendo el centro se enfriará y se aproximará a esa temperatura, pero no se congelará hasta que el frente de congelación la haya superado (Pham, 2014).



**Figura 2. Etapas de congelación de un cuerpo de agua (línea sólida) y de un alimento sólido (línea punteada) (Pham, 2014)**

### 1.3. Transferencia de calor por conducción

Los alimentos son congelados por el contacto con un medio frío, el cual remueve calor de ellos. El mismo fundamento se aplica para su descongelación, pero de manera inversa con un medio caliente. En un sólido, la transferencia de calor se describe por la Ley de Fourier de conducción de calor (Liu et al, 2017), la cual declara que un flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$ :

$$\mathbf{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $q$  es el flujo de calor ( $\frac{W}{m^2}$ ),  $T$  es la temperatura (K),  $x$  es la distancia en la dirección del flujo de calor (m) y  $k$  es la conductividad térmica ( $\frac{W}{mK}$ ).

Para el flujo de calor en tres dimensiones la ecuación se generaliza en notación vectorial a:

$$\mathbf{q} = -k\nabla T \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde  $q = (q_x, q_y, q_z)^T$  es el flujo de calor en tres direcciones y  $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)^T$  es el gradiente operador.

Cuando el flujo  $q$  no es uniforme, la energía se acumula o disipa, causando que la temperatura cambie como se describe en la Ecuación 3 (Campañone y Zaritzky, 2012).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del sólido ( $\frac{kg}{m^3}$ ),  $C_p$  es el calor específico ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ), y  $Q$  la energía generada al interior  $\frac{W}{m^3}$ , como la generada por radiación por microondas.

Para resolver la ecuación 3, deben conocerse condiciones límite. La más común es la condición de frontera convectiva, también conocida La ley de enfriamiento de Newton, la cual especifica que el flujo de calor en la superficie es proporcional a la diferencia entre la temperatura de superficie " $T_s$ " y la del medio ambiente " $T_a$ ":

$$q_s = -(k \nabla T)_s \cdot \mathbf{n} = h(T_s - T_a) \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde " $\mathbf{n}$ " es el vector de unidad normal hacia la superficie y " $h$ " es el coeficiente de transferencia de calor ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ). Cuando " $h$ " tiende a infinito, obtenemos una condición frontera de primer grado  $T_s = T_a$ , y con  $h=0$

obtenemos una condición de frontera adiabática (Cleland & Earle, 1977), describiendo una operación de congelamiento sin la presencia de una fuente interna de calor en el producto.

#### **1.4. Modelamiento de un proceso de descongelado**

La congelación ocupa un lugar importante en la tecnología de preservación de alimentos al combinar los beneficios de una vida de anaquel larga (meses o años) con una excelente retención de nutrientes y características sensoriales y una completa ausencia de crecimiento microbiano. Con la aplicación de la refrigeración industrial vino cierta demanda de técnicas con bases científicas para el cálculo y diseño de equipos y procesamientos de congelación y la predicción del tiempo de congelado de alimentos (Pham, 2014).

Por décadas, el único método disponible para el cálculo de tiempos de congelado y descongelado era la ecuación de Planck, presentada en 1913, la cual daba resultados con imprecisión significativa.

A través de los años ecuaciones empíricas para productos específicos basadas en la ecuación de Planck fueron

desarrolladas. Simultáneamente, con la disponibilidad de computadoras, se han aplicado métodos numéricos como el de diferencias finitas y elementos finitos, permitiendo el modelado a cualquier precisión requerida de alimentos con estructura, propiedades y geometría complejas.

En el modelado de la transferencia de calor durante un proceso con microondas se debe considerar en forma especial la interacción de la energía electromagnética con el alimento. Las ecuaciones de Maxwell describen el comportamiento de los campos electromagnéticos y su distribución en el interior de los hornos de microondas, vacíos o cargados (Clemens y Saltiel, 1996).

Diversos autores han utilizado el Método de Elementos Finitos (MEF) en el modelamiento de descongelado por microondas de alimentos como vegetales, carne de res y puré de papa. Éste tiene como principio, convertir la ecuación diferencial parcial del elemento, acotada por las condiciones de frontera, en un sistema de ecuaciones algebraicas que al ser resuelto permita hallar una buena aproximación de la variable dependiente en cada una de las coordenadas espaciales de la región de interés. Alternativamente, los parámetros de la función de

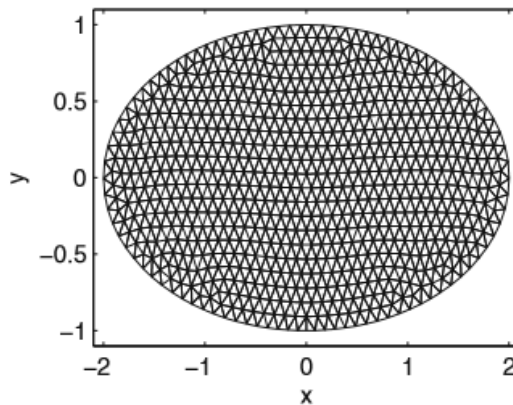
aproximación para cada uno de los elementos del dominio (Chen et al, 2016).

### **1.5. Método de Elementos Finitos (MEF)**

Un método numérico en este contexto, es una técnica para el cálculo de una ecuación diferencial que define a un fenómeno físico, siendo el de Elementos Finitos un método muy aplicado. En este método el “dominio” en donde se define la ecuación diferencial es fragmentado en regiones más pequeñas conocidas como *elementos* (Figura 3) y convierte la ecuación diferencial parcial, acotada por las condiciones de frontera (restricciones adicionales incluidas en una ecuación diferencial), en un sistema de ecuaciones algebraicas que al ser resueltas se obtiene una aproximación de la variable dependiente en cada uno de los elementos en la región de interés (Zienkiewics & Taylor, 2000).

El MEF tiene 3 principales características que lo hacen atractivo desde el punto de vista práctico; en primera, este método puede manejar dominios con forma arbitraria. Es aplicable para ecuaciones que plantean el dominio tales como el exterior de una aeronave cuando se quiere estimar las fuerzas que actúan sobre esta, un país entero cuando se

quiere calcular el esparcimiento de una enfermedad; o el pulmón de una persona cuando se modela el transporte de oxígeno del aire a la sangre del paciente. Su segunda cualidad, es que se pueden manejar fácilmente las condiciones fronteras específicas de la derivada de la solución. Finalmente, cuando se necesita mayor precisión en la solución de elementos finitos podemos fragmentar el dominio en elementos más pequeños (Whiteley, 2017).



**Figura 3. Partición del dominio de la elipse “ $\frac{x^2}{4} + y^2 = 1$ ” en elementos triangulares**



Para ejemplificar una ecuación diferencial parcial, definida en el interior de la elipse  $x^2/4 + y^2 = 1$ , se plantea una condición frontera de Dirichlet donde  $y \leq 0$ :

$$u(x, y) = x,$$

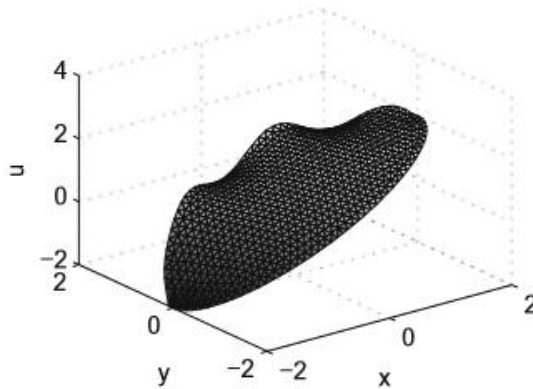
y la condición frontera de Neumann en el límite de la elipse donde  $y > 0$ , dado por:

$$(\nabla u) \cdot n = \sin(2(x + y)).$$

Así se define la ecuación diferencial parcial en el interior de la elipse  $\frac{x^2}{4} + y^2 = 1$  por:

$$-\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = 1$$

Al separar la elipse en elementos, se puede calcular la solución del método de elementos finitos de la ecuación diferencial. El vector  $n$  que aparece en la especificación de la condición límite de Neumann es el vector normal apuntando fuera de la elipse con unidad de longitud. La solución de la ecuación con el método numérico, que es una aproximación lineal de la solución en cada elemento se muestra en la figura 4.



**Figura 4. Aproximación de elementos finitos a la solución de la ecuación diferencial de una elipse**

Con el fin de facilitar la implementación del MEF han sido desarrollados ciertos softwares comerciales. Estos programas disponen de módulos pre-configurados que permiten un rápido planteo y resolución numérica de métodos numéricos aplicados en simulaciones tridimensionales de fenómenos físicos (Campañone & Zaritzky, 2012). En este trabajo, se desarrolló la simulación tridimensional de un calentamiento por microondas de brócoli congelado utilizando el software COMSOL Multiphysics, un paquete de modelización para la simulación de cualquier proceso físico que se pueda describir mediante ecuaciones en derivadas parciales. Está provisto de la última tecnología y algoritmos de

resolvedores que pueden manejar problemas complejos de forma rápida y precisa, mientras que su intuitiva estructura está diseñada para proporcionar una gran facilidad de uso y flexibilidad, lo que lo hace un software de modelado y simulación ideal para la investigación, el desarrollo de productos y la educación (Montes, 2015). La simulación se desarrolló asignando datos de propiedades termodinámicas y constantes dieléctricas específicas del brócoli congelado a un modelo tridimensional de una muestra de alimento dentro de una cavidad de horno de microondas a condiciones de distribución de campo electromagnético fijas, para obtener la historia térmica de 3 puntos de la muestra simulada, utilizando el módulo del software de ondas electromagnéticas con las ecuaciones de transferencia de calor en estado estacionario, aplicadas a un dominio tridimensional.

## **1. 6. Transferencia de calor por radiación**

La transferencia de calor por radiación se basa en el transporte de energía a la velocidad de la luz sin la necesidad de un medio material. Siendo el único mecanismo que transporta calor en el vacío.

Este mecanismo está constituido principalmente por tres etapas o fases:

- 1) La emisión de energía radiante por una fuente de calor, como el sol o la pared de un horno a fuego directo, o el magnetrón en un horno de microondas en forma de ondas electromagnéticas.
- 2) El desplazamiento de las ondas a través del espacio en línea recta y a la velocidad de la luz.
- 3) Cuando las ondas electromagnéticas se ponen en contacto con otro cuerpo, una porción de la energía incidente es absorbida por él y se transforma en energía térmica, en un proceso de resonancia (Datta & Ramaswamy, 2001).

### **1.6.1. Calentamiento por microondas**

En los últimos 20 años el uso de microondas (MO) ha encontrado muchos campos de aplicación en los procesos de calentamiento de productos químicos y alimenticios, tanto a nivel doméstico para calentar, cocinar y descongelar, como en el desarrollo de equipos industriales, ampliando enormemente su uso. De esta forma, en el procesamiento de alimentos a nivel industrial, las microondas se han utilizado durante los últimos años en

operaciones como el secado, pasteurizado, esterilizado y freído de diversos productos, en descongelación de carne, tratamiento y manejo de mantequilla congelada, pasteurización en flujo continuo de leche, crema, yogurt, salsas, purés y alimentos infantiles (Hinestroza et al, 2008). La versatilidad de la tecnología MO le ha permitido ser aplicada en un sinnúmero de procesos y con un objetivo claro: ser una tecnología amigable con el medio ambiente y que permita reducir costos de operación.

El calentamiento con microondas se refiere al uso de ondas electromagnéticas de ciertas frecuencias para generar calor en un material, las cuales son asignadas por la Comisión Federal de Comunicaciones de EE.UU. (Datta & Ramaswamy, 2001).

En el procesamiento de alimentos por microondas se usan las frecuencias de 2450 y 950 MHz. De estas dos, la de 2450 MHz es usada en hornos domésticos y ambas son usadas en el calentamiento a nivel industrial.

La región de microondas del espectro se encuentra entre la radiación infrarroja y las frecuencias de radio, a longitudes de onda entre 1 cm y 1 m (Figura 5). Los calentadores por microondas domésticos e industriales están programados

para operar a 12.2 cm de longitud de onda (2450MHz) o 33.2 cm de longitud de onda (950 MHz) (Michael et al, 1997).

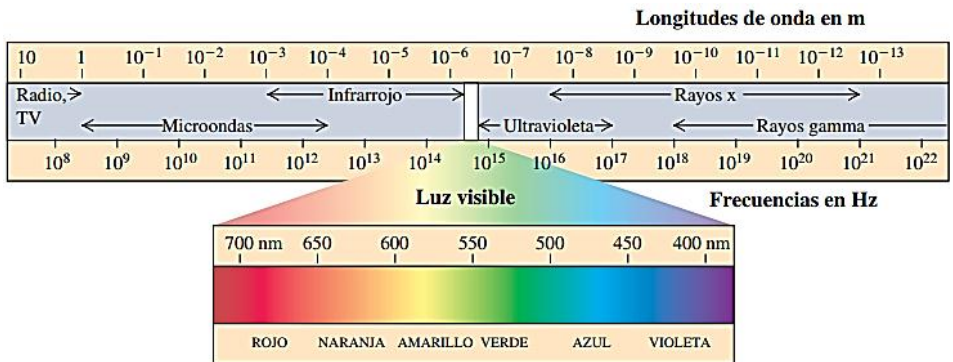


Figura 5. Espectro electromagnético (Sears & Zemansky, 2009)

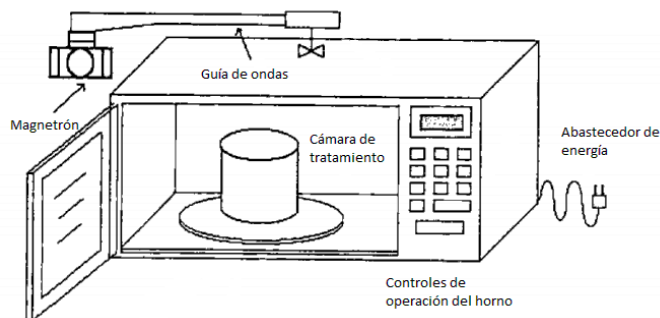
### 1.6.2. Componentes principales de horno de microondas

Aunque varios son los componentes de un horno de MO (Figura 6), la operación de calentamiento se basa en tres de ellos (Schlegel, 1992):

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

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

- 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.
- 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.



**Figura 6. Horno de microondas y sus componentes**

**(Datta & Ramaswamy, 2001)**

### **1.6.3. Mecanismos de calentamiento por microondas en alimentos.**

El proceso de generación de calor con microondas involucra principalmente dos mecanismos: Dieléctrico y iónico. Se le denomina un material dieléctrico a aquel que cuenta con una conductividad eléctrica muy baja ( $<1$ ), es decir, un aislante, el cual tiene la propiedad de formar dipolos eléctricos en su interior bajo la acción de un campo eléctrico. Los alimentos son considerados materiales dieléctricos, los cuales no son ni conductores perfectos, ni aislantes (Hinestroza et al, 2008).

Estas propiedades dieléctricas están determinadas por el contenido de humedad, sales y aire por sus características dipolares, siendo el agua el principal responsable del calentamiento dieléctrico. El cambio rápido en el campo electromagnético (EM) intenta polarizar las moléculas de agua. Sin embargo, estas moléculas no pueden seguir esta polarización tan rápida, por lo que en estas oscilaciones moleculares, parte de la energía se pierde en forma de calor (Metaxas & Meredith, 1988).

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 (Schlegel, 1992).

Las propiedades dieléctricas son caracterizadas como una función de la frecuencia en la que oscilan las ondas EM y la temperatura que son aplicadas al producto. La permitividad eléctrica  $\epsilon$  de un producto se define como:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon' \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{12} \frac{F}{m}$  es la permitividad del espacio libre y  $\epsilon'$  es la permitividad relativa (también llamada constante dieléctrica, la cual es la capacidad de retener energía electromagnética).

La conductividad efectiva  $\sigma_{eff}$  está relacionada con el factor relativo de pérdida  $\epsilon''$ , el cual describe la capacidad de disipar la energía en forma de calor dentro del material.

$$\sigma_{eff} = \omega \epsilon_0 \epsilon'' \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular. Una conductividad efectiva convencional genera la disipación de energía de microondas. En los casos más generales, la

$\sigma_{eff}$  puede variar tanto por la temperatura como por el contenido de humedad. Las ondas EM que chocan con el alimento se atenúan exponencialmente durante la absorción de la energía EM.

La profundidad de penetración  $dp$ , definida como la distancia desde la superficie donde la potencia de la onda EM disminuye hasta un 1/e del valor de la superficie, puede ser calculada con la siguiente expresión (Saltiel & Datta, 1999):

$$dp = \frac{\lambda_0}{2\pi(2\epsilon')^{1/2}} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right)^{1/2} - 1 \right]^{-1/2} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda de radiación incidente en el espacio libre.

#### 1.6.4. Leyes de la Radiación

La teoría electromagnética se basa en las formulaciones propuestas por James Clerk Maxwell, quien llegó a un planteamiento matemático a partir de las ecuaciones de Gauss y Faraday conocidas en su época, reduciendo las leyes de electricidad y magnetismo a ecuaciones diferenciales que comprenden flujos y circulaciones de campos EM. Éstas se conocen como las ecuaciones de

Maxwell y gobiernan la distribución de campos EM en el espacio y tiempo. En forma diferencial pueden expresarse en términos de intensidad de campo eléctrico  $E \left[ \frac{V}{m} \right]$  y campo magnético  $H \left[ \frac{A}{m} \right]$ .

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial(\mu \mathbf{H})}{\partial t} \quad \text{Ec. (8)} \quad \text{Ley de inducción de Faraday}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial(\epsilon \mathbf{E})}{\partial t} \quad \text{Ec. (9)} \quad \text{Ley de Ampere}$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho \quad \text{Ec. (10)} \quad \text{Ley de Gauss para el campo eléctrico}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{0} \quad \text{Ec. (11)} \quad \text{Ley de Gauss para el campo magnético}$$

Donde  $\epsilon$  es la permitividad eléctrica  $\left[ \frac{F}{m} \right]$ ,  $\mu$  es la permeabilidad magnética  $\left[ \frac{H}{m} \right]$  y  $J$  la densidad de corriente eléctrica  $\left[ \frac{A}{m^2} \right]$ , que involucra la conductividad efectiva:

$$\mathbf{J} = \sigma_{eff} \mathbf{E} \quad \text{Ec. (12)}$$

Maxwell demostró que existía una inconsistencia lógica en la Ley de Ampere, cuando se aplicaba a situaciones relacionadas con campos eléctricos dependientes del tiempo, ya que anteriormente se suponía que no existían campos eléctricos variables. Descubrió que esa inconsistencia se podría evitar añadiendo el término de corriente de conducción a la de corriente de desplazamiento en la Ley de Faraday (Campañone & Zaritzky, 2012).

Maxwell demostró que una perturbación electromagnética al propagarse debería presentar todas las características del movimiento ondulatorio; por lo tanto, dicha radiación electromagnética, experimenta la reflexión, la refracción y la difracción exactamente como sucede con todas las ondas. Por este motivo, la perturbación constituida por la propagación del campo eléctrico y magnético ha recibido el nombre de “onda electromagnética”.

## **II. Metodología Experimental**

### **2. 1. Objetivo general**

Analizar los efectos en una muestra de brócoli congelado sujeto a un proceso de calentamiento por microondas, con respecto a sus cambios fisicoquímicos por medio de pruebas experimentales, y su transferencia de calor por medio de la aplicación de un modelamiento matemático, para el desarrollo de una simulación con la cual obtener una predicción de los tiempos correctos del proceso de descongelado de brócoli usando el software comercial COMSOL Multiphysics 4.3.

#### **2.1.1. Objetivo particular 1**

Aplicar un modelamiento matemático teórico de calentamiento por microondas, involucrando el comportamiento electromagnético con la transferencia de calor para su aplicación en una simulación por computadora.

#### **2.1.2. Objetivo particular 2**

Evaluar los efectos de un tratamiento con microondas en brócoli congelado a diferentes tiempos de proceso, en sus compuestos bio-activos (fenoles totales) a través de

pruebas espectrofotométricas, para obtener un perfil de cambios con respecto a tiempo y temperatura.

### **2.1.3. Objetivo particular 3**

Aplicar el método numérico de Elementos Finitos en un software comercial (COMSOL Multiphysics 4.3) utilizando un modelo matemático teórico, para la simulación del proceso de descongelado por microondas de brócoli en la cual se describa la historia térmica del producto.

## **2.2. Materiales**

-muestra de 100 gr. De brócoli congelado comercial marca CALIFORNIA SPRINGS

-horno de microondas SAMSUNG modelo MC32K7055.

-termómetro bi-metálico.

-software Comsol Multiphysics Inc., Boston, Mass, U.S.A.

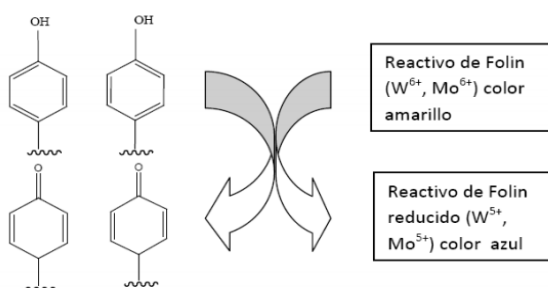
## **2.3. Métodos**

-Elaboración de una curva patrón de ácido gálico con espectrofotómetro VELAB T.M.

-Preparación de muestras de brócoli congelado con geometría de medias esferas con 10 cm de diámetro.

### 2.3.1. Determinación de poli-fenoles totales

El método de Folin-Ciocalteu se utilizó para la determinación de compuestos fenólicos totales en el producto. Se basa en que los compuestos fenólicos de la muestra reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteu, el cual es una mezcla de fosfomolibdato y fosfotungstato, a pH básico. El ácido fosfomolibdotúngstico, de color amarillo, al ser reducido por los grupos fenólicos da lugar a un complejo de color azul intenso que presenta un máximo de absorción a 765 nm, que se cuantifica con un espectrofotómetro en base a una recta patrón de ácido gálico, un ácido fenólico cuya intensidad es la que se mide para evaluar el contenido en polifenoles (Lacueva et al, 2010).



**Figura 7. Mecanismo de acción del reactivo Folin-Ciocalteu (Garcia et al, 2010)**

### 2.3.1.1. Cinética de degradación de poli-fenoles

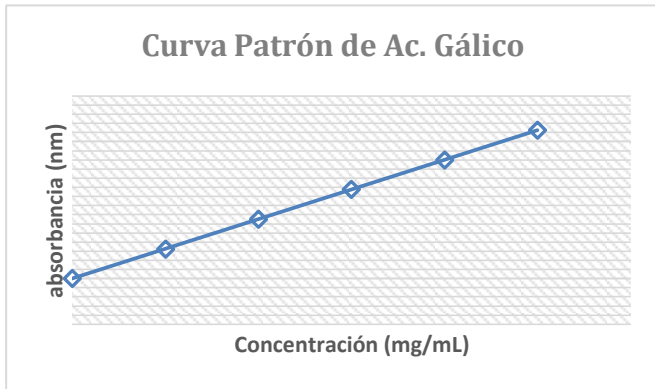
La cantidad de compuestos polifenólicos y tipos presentes en un alimento varía en función de la especie vegetal, horas de exposición solar, grado de madurez, condiciones de cultivo, procesado, condiciones de almacenamiento, etc. Los compuestos polifenólicos presentan en su estructura química uno o más anillos de benceno y uno o más grupos hidroxilados (Quiñones et al,2012).

El método Folin Ciocalteu emplea ácido gálico, un compuesto fenólico representante y predominante en variedad de alimentos para realizar una curva patrón (Figura 8) obteniendo datos de la concentración de ácido gálico por espectrofotometría para la descripción gráfica de la degradación que esta sustancia tendría, al estar expuesto a altas temperaturas durante el calentamiento a través de un horno de microondas.

Obteniendo valores de absorbancia con respecto a la concentración por medio de una regresión lineal se obtuvo la ecuación de la recta:  $y = mx + b$ ; obteniendo la ecuación despejada:

$$Conc_{polifenoles} = \frac{absorbancia - b}{m} \quad \text{Ec. (13)}$$





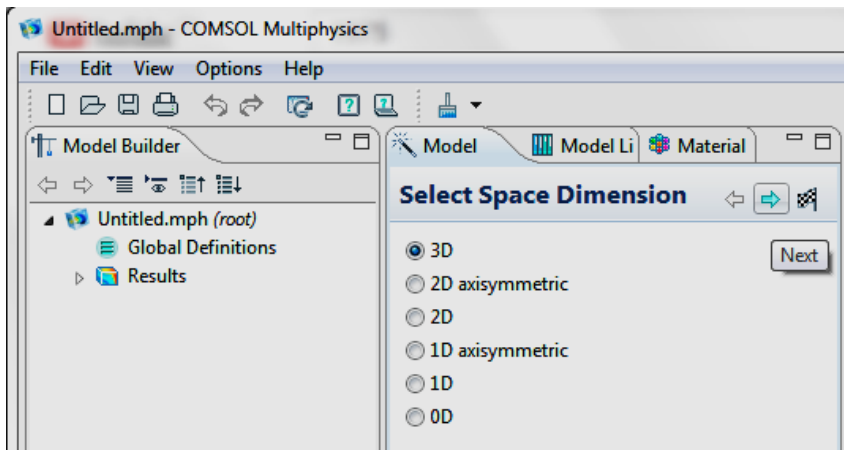
**Figura 8. Ejemplo de curva patrón de Ácido Gálico**

### **2.3.2. Desarrollo de simulación**

Se implementó una simulación computacional utilizando el balance de energía del módulo de calentamiento por microondas en (COMSOL, 2013), el cual relaciona las propiedades térmicas y electromagnéticas dependientes de la temperatura y las constantes dieléctricas del producto a calentar. Se validaron las predicciones de historias térmicas del modelo con datos experimentales obtenidos en el laboratorio y se comparó la exactitud de las predicciones obtenidas con las diferentes herramientas numéricas.

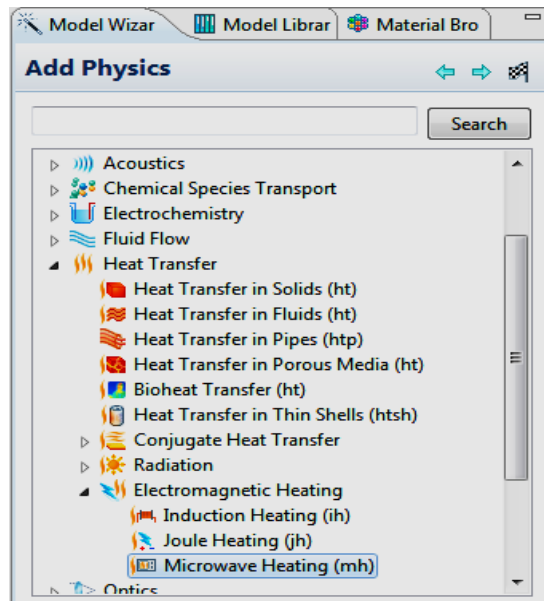
### 2.3.2.1. Estrategia de modelamiento

Se usó el módulo MODEL WHIZARD de simulación de calentamiento por microondas del software comercial COMSOL Inc., Boston, Mass, U.S.A., el cual aplica un método numérico tridimensional de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones diferenciales, en la descripción de los múltiples fenómenos que involucra el proceso en el modelo de descongelado. El desarrollo de la simulación inició por la selección de la dimensión espacial (Figura 9). Este modelo considera la geometría real del objeto y su interacción con el horno de microondas con un esquema del dominio de simulación 3D.

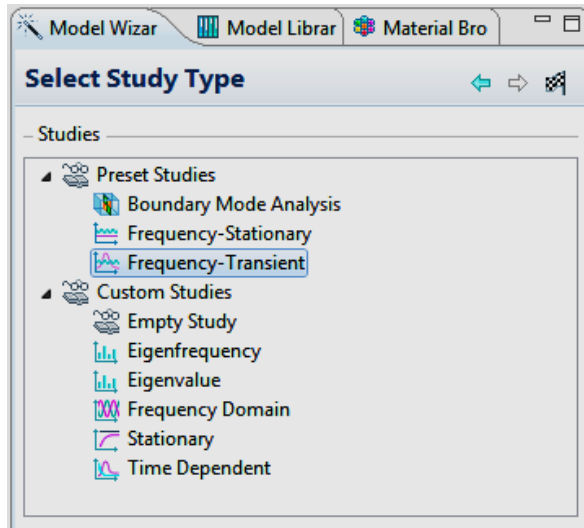


**Figura 9. Selección de dimensiones del modelo a 3D**

Se seleccionó el fenómeno a estudiar, eligiendo dentro del módulo de transferencia de calor, calentamiento electromagnético y de éste, la sección de calentamiento por microondas (Figura 10) para un tipo de estudio de frecuencia transitoria (Figura 11).

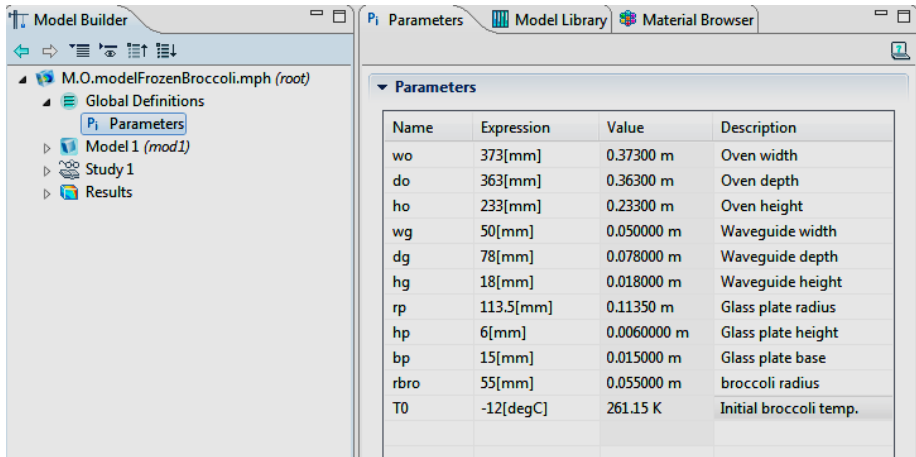


**Figura 10. Selección del fenómeno del proceso de calentamiento por microondas**

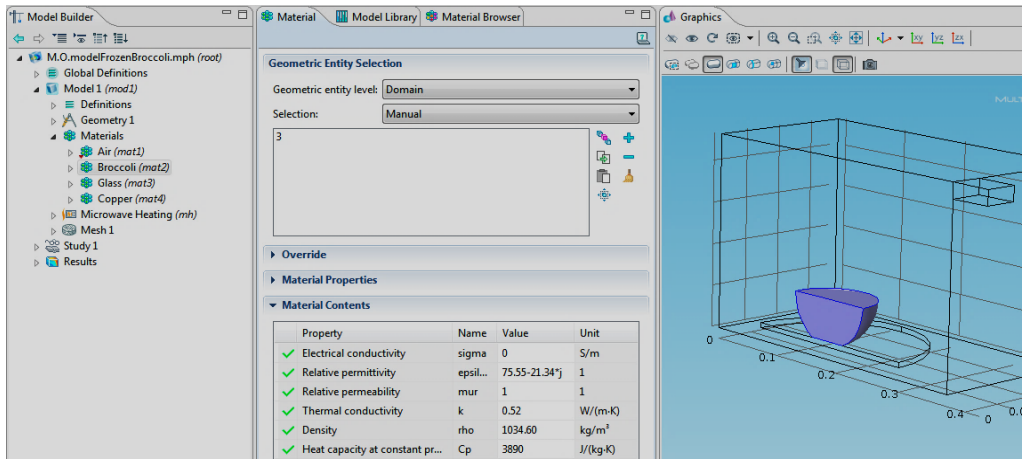


**Figura 11. Selección de tipo de estudio de Frecuencia transitoria**

Al definir la simulación a un plano tridimensional y los fenómenos físicos involucrados, se definieron los parámetros y geometrías de todos los objetos que forman parte del modelado (Figuras 12 y 13). Se planteó la simulación de un horno de microondas de 1000 W, a una frecuencia de onda de uso doméstico de 2,45 GHz con dimensiones de cavidad de horno de 373 x 233 x 363 mm<sup>3</sup>. Se modeló una muestra de 100 g de brócoli congelado comercial considerar la muestra como una fase sólida única a una temperatura inicial de -12 °C y una geometría de media esfera con un radio de 55 mm.

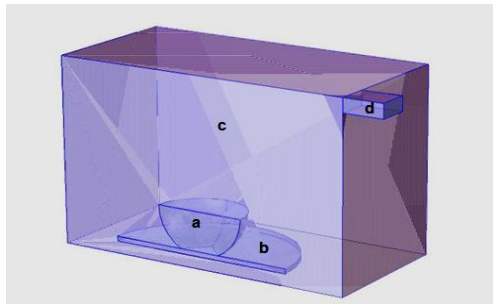


**Figura 12. Asignación de valores de los parámetros para todos los componentes físicos en la simulación**



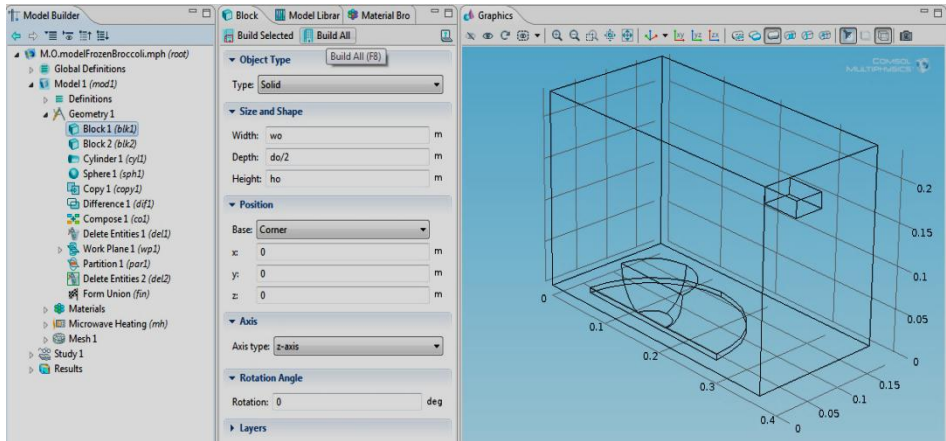
**Figura 13. Definición de geometría de los componentes de la simulación (2 bloques, 1 cilindro, 1 media esfera)**

El modelo se diseñó con una disección vertical con la finalidad de plantear una propiedad de simetría, simulando solamente la mitad de la geometría (Figura 14). Se propuso que la distribución de calor será la misma en la otra mitad no simulada.



**Figura 14. Esquema de corte de horno de microondas. Partes: (a) muestra de brócoli, (b) plato de vidrio, (c) cavidad de resonancia, (d) guía de ondas**

Al contar con las geometrías, se prosiguió con la simulación definiendo las propiedades termodinámicas (ANEXO 1) y dieléctricas del brócoli y el aire presente en la cavidad (ANEXO 2) para la descripción del campo electromagnético dentro del alimento y el desarrollo de la fuente de calor volumétrico (Figura 15).



**Figura15. Definición de propiedades termo-físicas y dieléctricas del alimento**

### 2.3.2.2. Electromagnetismo

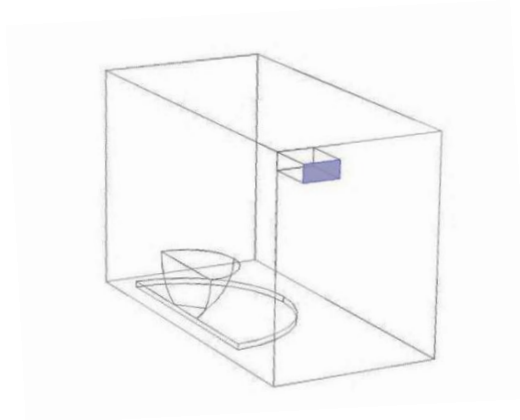
El siguiente paso a definir en la simulación el dominio del modelo dónde se aplica la conversión de energía EM a energía térmica para la obtención del perfil de temperaturas. Para la descripción del campo electromagnético y su interacción con el alimento al ser expuesto a éste se hace uso de las ecuaciones de Maxwell (Ecuaciones 13-16) obteniendo la ecuación de forma de onda de Maxwell (COMSOL, 2013).

$$\nabla \cdot \mu_r^{-1} (\nabla \cdot E) - k_0^2 (\epsilon_r \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0}) E = 0 \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde  $E$  es la fuerza del campo magnético  $\left[\frac{V}{m}\right]$ ,  $\mu_r$  la permeabilidad relativa,  $\sigma$  conductividad eléctrica  $\left[\frac{S}{m}\right]$ ,  $\epsilon_r$  es permitividad relativa,  $\omega_o$  es la frecuencia angular  $\left[\frac{rad}{s}\right]$  y  $k_0$  es la constante de propagación de onda. Las pérdidas bajo la influencia de un campo magnético pueden describirse de una manera similar a las pérdidas de materiales eléctricos. Sin embargo, la mayoría de los materiales usados en los procesos con microondas son magnéticamente transparentes. Así, en este proyecto la permeabilidad magnética adimensional se asume  $\mu_r = 1$ .

El puerto rectangular es excitado por una onda eléctrica transversal (TE), la cual es una onda que no tiene componente de campo eléctrico en la dirección de propagación (Figura 16). A una frecuencia de excitación de 2.45GHz, el modo  $TE_{10}$  es el único modo de propagación a través de un guía de ondas rectangular (COMSOL, 2013).





**Figura 16. Posición del guía de onda modo TE<sub>10</sub> rectangular**

El software calcula la frecuencia de corte para los diferentes modos descrita por la relación analítica:

$$f_c = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde m y n son el número de “modos” y c denota la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s). Para el modo TE<sub>10</sub>, m=1 y n=0. Con las dimensiones de la sección cruzada rectangular (a=50 mm b=78 mm), El modo TE<sub>10</sub> es el único modo de propagación para frecuencias entre 1.92 GHz y 3.84 GHz (COMSOL, 2013). Así, se expresa el cálculo de la Constante de propagación de onda  $k_0$ :

$$k_0 = \frac{2\pi}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} \quad \text{Ec. (16)}$$

Una onda electromagnética pierde su energía al viajar a través de un medio de pérdida dieléctrica como lo son los alimentos. Parte de la energía electromagnética se convierte en energía térmica dentro del alimento. Ésta conversión de energía es proporcional a las propiedades dieléctricas y al cuadrado de la fuerza del campo electromagnético (Datta & Ramaswamy, 2001):

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu''_{eff} |H|^2 \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde Q es la velocidad de calentamiento volumétrico.

En el caso de materiales dieléctricos no hay pérdidas magnéticas, por lo que el segundo término del lado derecho de la ecuación 22 puede ser omitido (Dincov et al, 2004).

Por consecuencia, la velocidad de calentamiento volumétrico puede ser aplicado desde la amplitud de campo eléctrico E máxima en:

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \quad \text{Ec. (18)}$$

### 2.3.2.3. Conservación de energía

La ecuación de conservación de energía usada para el fenómeno por diversos autores (Pitchai, Chen et al, 2014); involucra energía por convección en el transporte de masa y conducción por la ley de Fourier, en este caso planteada de manera que presente un cambio de fase y fuentes de calor localizable:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q + S \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica  $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ ,  $\rho$  es la densidad  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ ,  $C_p$  es la capacidad calorífica  $\left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C}\right]$  y  $Q$  es la energía volumétrica disipada  $\left[\frac{W}{m^3}\right]$ . El término adicional de fuente de energía  $S$  es la fuente de calor latente en el cambio de fase  $\left[\frac{W}{m^3}\right]$ . El valor de esta fuente depende del cambio en la fracción de líquido en cada celda en el enmallado. Los alimentos son materiales de composición múltiple, así el cambio de fase toma lugar usualmente dentro de un intervalo de temperatura finito (Tilford et al, 2006). Una fracción de líquido se define para cada elemento del enmallado y aproximada como una

variación lineal de fracción de líquido entre las temperaturas de sólido ( $T_s$ ) y de líquido ( $T_l$ ):

$$f(T) = 0, \quad T < T_s$$

$$f(T) = 1, \quad T > T_l$$

$$f(T) = \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, \quad T_s \leq T \leq T_l$$

Así el término de fuente de calor debido al cambio de fase se representa como:

$$S = -\rho L \frac{\partial f}{\partial t} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde  $\rho$  es la densidad  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ ,  $L$  es el calor latente  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ ,  $f$  es la fracción de líquido y  $t$  el tiempo  $[s]$ .

#### 2.3.2.4. Condiciones Frontera

Se tomaron las siguientes consideraciones para el modelamiento.

1. No se considerarán cambios en el volumen de la muestra (tamaño constante).
2. Temperatura y contenido de agua inicial uniformes dentro del alimento.

3. Propiedades térmicas, dieléctricas y de transporte dependientes de la temperatura y del contenido de humedad.
4. No se aplica una rotación de la muestra en el plato de vidrio del horno.

La Ecuación 14 se resolvió tomando en cuenta como condiciones de contorno:

5. Las paredes del horno y guía de ondas son consideradas conductores eléctricos perfecto

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0}$$

6. El plano central se tuvo en cuenta una condición de simetría se plantea como conductor magnético perfecto.

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0}$$

Donde “n” representa la unidad de vector normal en la interfase.

7. La radiación electromagnética ocurre a una frecuencia de 2450 MHz en una guía de onda rectangular trabajando en un modo TE<sub>10</sub>

8. La superficie del alimento hace un intercambio de calor por convección con el aire que lo rodea, expresado en:

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

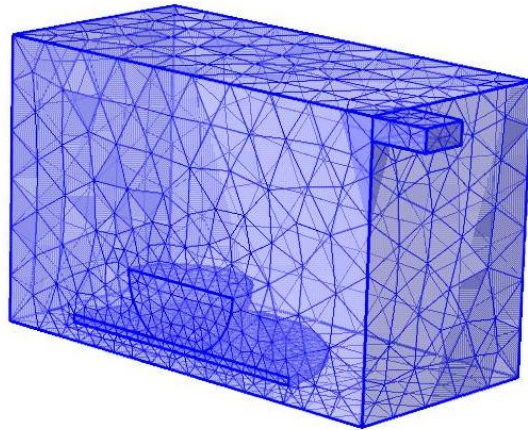
$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) \quad t > 0$$

Este intercambio de calor entre el aire y el brócoli se aproxima suponiendo un valor de coeficiente de transferencia de calor de  $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot C}$ , el cual es el valor típico usado en la transferencia de calor por convección en el aire (Campañone y Zaritzky, 2012).

Para asegurar que esta suposición sea válida, el ventilador interno de la cavidad del microondas se apagó para que tome lugar una convección natural en la interfase aire-alimento.

El software COMSOL Multiphysics TM utiliza una partición del modelo geométrico en formas más simples para la aplicación del método numérico. La cantidad de elementos de la malla utilizada influirá la representación del modelo. En este trabajo se resolvió con 3161 nodos y 5234 elementos tetraédricos, utilizando un mallado

diferencial del dominio considerando diferentes subdominios como el interior del horno, el guía de ondas, el plato rotatorio y el alimento, como se muestra en la figura 17. Dentro del producto se incorporó un tamaño máximo de elementos de 14.8 mm. El balance de energía se resolvió por medio del módulo de transferencia de energía en estado transitorio.

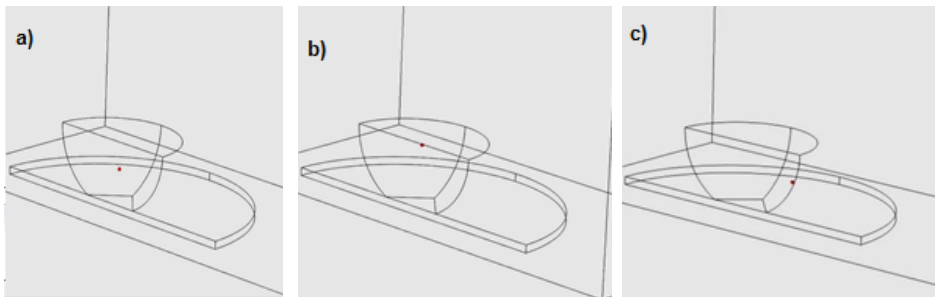


**Figura 17. Mallado del dominio para la simulación electromagnética y de transferencia de calor**

Los cálculos tomaron 2169 s (36 minutos, 9 segundos) 148 s para alcanzar el tiempo final del proceso con el paquete de resolución utilizado. El software COMSOL estima los valores del campo electromagnético en cada posición de la

cavidad del horno y la energía absorbida por el alimento, describiendo el perfil de temperatura dentro del alimento a cada paso de tiempo.

Se obtuvo la descripción de historia térmica en 3 puntos específicos del alimento (Figura 18) para ser comparadas y validadas con datos experimentales.



**Figura 18a) Lectura de temperaturas en las diferentes posiciones de la muestra. (a) Centro, (b) Superficie & (c) Lateral**

### **2.3.3. Modelo de validación**

Para validar el modelo numérico se realizó el perfil de temperatura experimental de calentamiento de una muestra de brócoli congelado empleando un horno microondas marca SAMSUNG modelo MC32K7055 con potencia de 1000 W y frecuencia de operación de 2450 MHz. Se tomó



la temperatura de las muestras en las posiciones propuestas con un termómetro infrarrojo y uno bi-metálico, obteniendo la evolución de la temperatura en un punto en la superficie lateral, superior y en el centro de muestra de brócoli de 100 gr durante 50 s como se muestra en las Figuras 19a,b y c.



**Figura 19a) vista de planta de muestra. 19b) vista de elevación de muestra. 19c) calentamiento de muestra para validación de simulación**

La exactitud en la predicción del modelo se calculó a través del error relativo (ER) (Arballo et al, 2013), el cual es aplicable para cuantificar la incertidumbre en el resultado de un cálculo cuando los elementos del sistema no están distribuidos de manera uniforme. Es el cociente entre el error absoluto y el valor exacto.

$$\text{Error Relativo} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{\text{exp } i} - T_{\text{simu } i}}{T_{\text{exp } i}} \right| \quad \text{Ec. (21)}$$

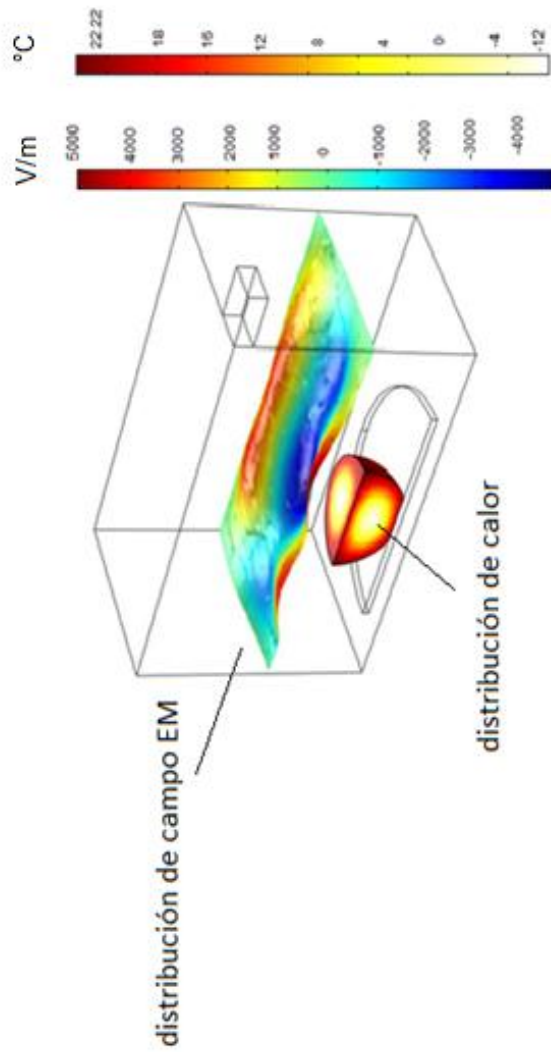
### **III. Análisis de resultados**

La Figura 20 muestra el resultado de la simulación computacional utilizando el modelo MEF, donde se puede visualizar el perfil de temperatura tridimensional del alimento y la interacción del campo eléctrico con éste y las paredes del horno. La distribución del campo electromagnético no es uniforme, presentando picos y valles.

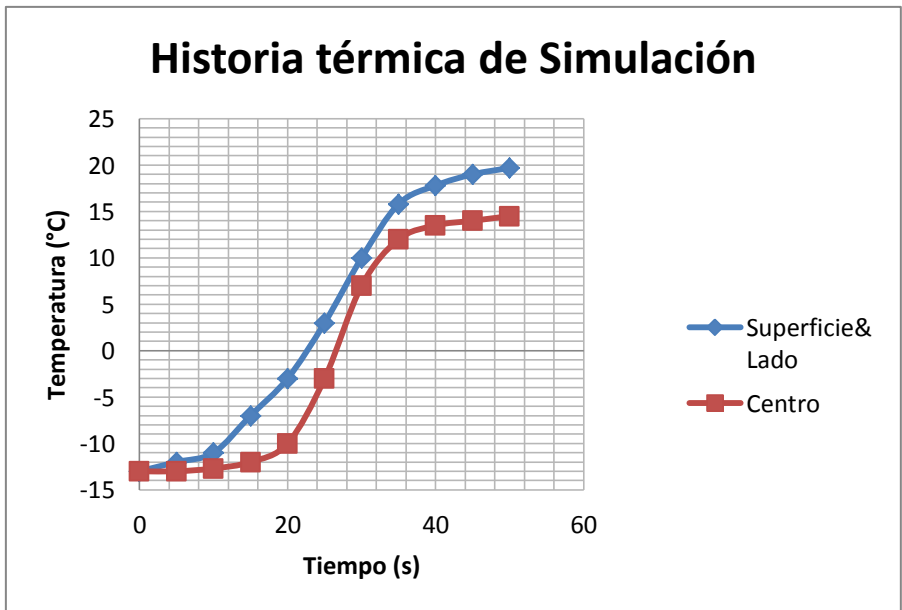
El pico máximo dentro del horno de 5005.3 V/m, se obtiene en el cuadrante superior sobre la superficie de la muestra. Considerando la distribución radial dentro del alimento se aprecia que el calentamiento con mayor intensidad fue a una profundidad de penetración muy baja (aproximada de 15mm).

El centro de la muestra presenta una velocidad de transferencia de calor lenta en comparación con la superficie, esto es debido a la interacción del campo eléctrico con las características geométricas y tamaño de la muestra.

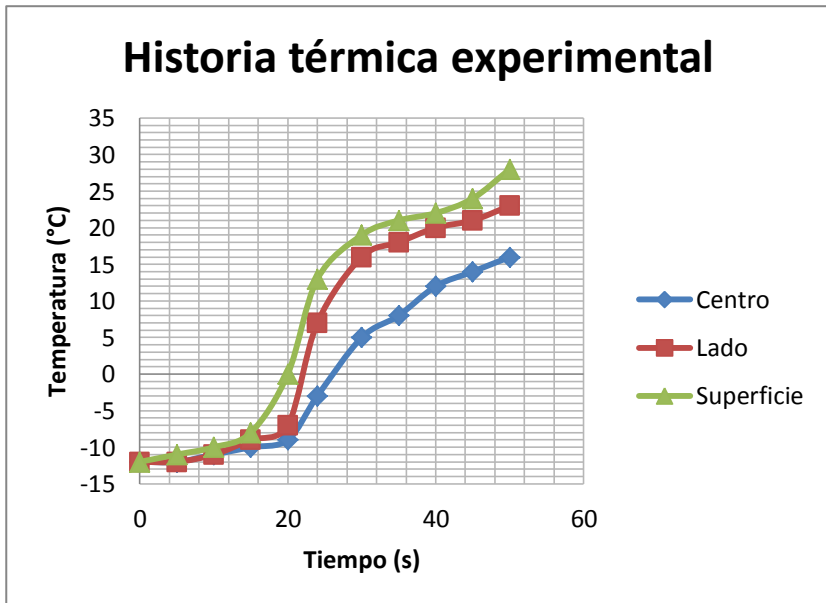
Figura 20. Perfiles de temperatura superficial de la muestra y distribución de campo eléctrico durante 30s de calentamiento con microondas (visualización de la mitad del horno).



Las Figuras 21 y 22 muestran la evolución de distribución de calor por simulación y por experimentación, respectivamente, en la superficie, lado y centro del alimento.



**Figura 21. Gráfica de Historia térmica obtenida con la simulación computacional**

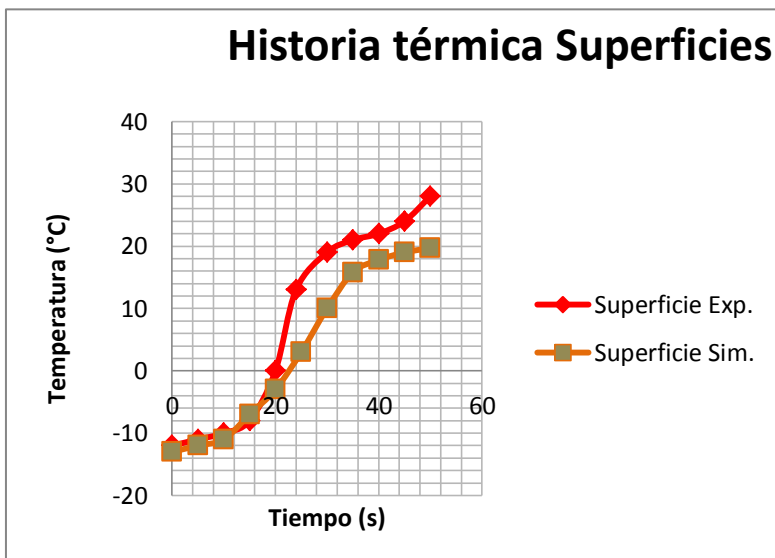


**Figura 22. Gráfica de Historia térmica de 3 puntos de muestra de brócoli obtenida experimentalmente**

Los resultados de historia térmica obtenidos (figuras 23, 24 y 25) presentaron una tendencia de calentamiento similar a los obtenidos experimentalmente. La simulación describe una predicción cercana a la historia térmica del proceso, aplicable en el intervalo de tiempo donde toma lugar el descongelado; sin embargo, los resultados difieren exponencialmente de los reales conforme pasa el tiempo de calentamiento por microondas. Esto debido a que en la etapa final del proceso de calentamiento, una cantidad

considerable de la energía EM absorbida supera el calor latente de evaporación y evapora el agua contenida en el alimento.

Así, factores como la transferencia de calor que crea un flujo vapor del interior a la superficie del alimento son de gran importancia y se tendrían que incluir como términos de transferencia de masa o fuentes de calor adicionales en el balance de energía para simulaciones donde se rebasens intervalos de temperatura aquí estudiados.



**Figura 23. Gráfica de comparación de historias térmicas simulada y experimental de la superficie de la muestra**

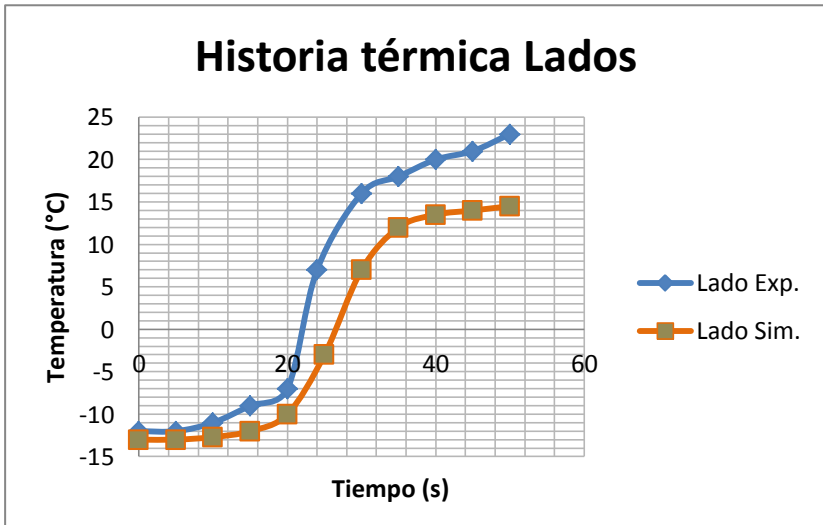


Figura 24. Gráfica de comparación de historias térmicas simulada y experimental del lateral de la muestra

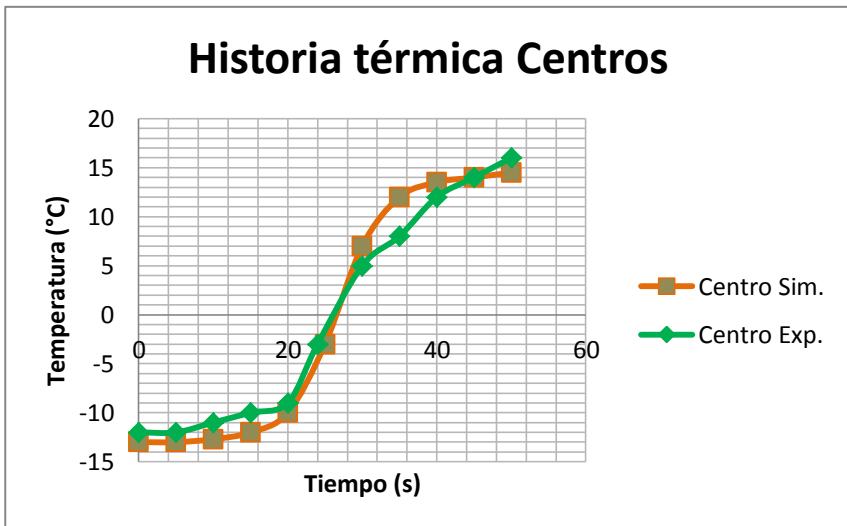


Figura 25. Gráfica de comparación de historias térmicas simulada y experimental de centro de muestra

En el Cuadro 2 se presenta la simulación más acertada con los valores más bajos de Error Relativo en el centro de la muestra. En los demás puntos aumenta el error relativo porque su simulación presenta un cálculo de decaimiento de potencia absorbida mayor al rebasar los 50 s de proceso.

**Cuadro 2. Error relativo de la simulación en 3 puntos de la muestra**

Posición	Error de Modelo	Porcentaje de error (%)
Centro	0.1421	14.21
Superficie	0.2440	24.40
Lado	0.2626	26.26



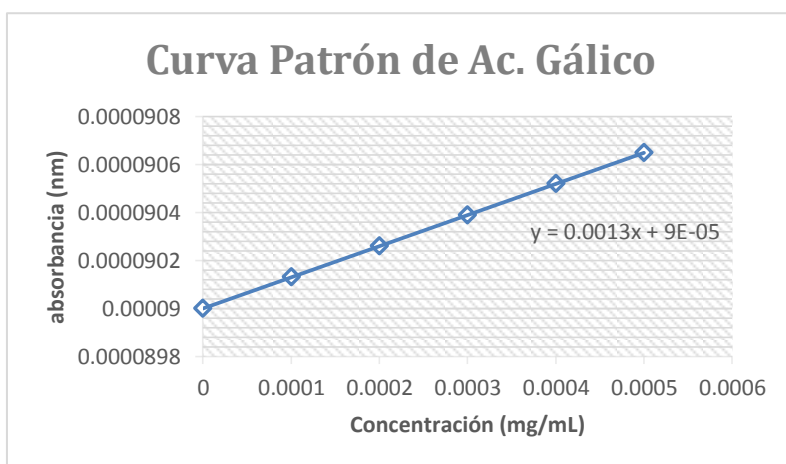
Las diferencias de la simulación pueden deberse a diversos factores. Al no ser un producto homogéneo el brócoli puede presentar zonas con variación en su composición y/o concentración de sales y humedad. Aunque estas variaciones son pequeñas, las propiedades dieléctricas altamente no-lineales pueden iniciar “puntos calientes”, creando un calentamiento irregular en aumento que no se refleja al suponer un producto homogéneo.

Se observa una discrepancia en la simulación aproximadamente después de los 50 segundos de calentamiento. Con procesos de derretimiento y evaporación ocurriendo simultáneamente en diferentes zonas de la muestra, se debe tomar atención detallada a los límites termales del modelamiento, particularmente en cuanto a evaporación, ya que en este caso tiene una influencia significativa en la distribución de temperatura.

Así, aunque las suposiciones hechas en el modelamiento dan una aproximación aceptable del proceso, ignoran factores importantes en el calentamiento de alimentos por microondas, limitando significativamente su habilidad para describir completamente el proceso real de calentamiento por microondas.

Se desarrolló una curva patrón de ácido gálico con la cual se obtuvo una descripción gráfica de degradación con la ecuación de la recta:

$$\text{Conc. Polifenoles} = \frac{\text{absorbancia} - (9E-05)}{0.0013}$$



**Figura 26. Curva patrón de Acido gálico**

En el Cuadro 3 se presentan los resultados promedio obtenidos de la prueba Folin-Ciocalteu en muestras de brócoli después de un proceso de descongelado por microondas de 50 segundos.

Estos resultados dieron valores de polifenoles totales con una diferencia muy pequeña a los valores iniciales, previo al calentamiento.

Se aprecia una mejor retención de estos compuestos bio-activos, a diferencia de los resultados de polifenoles totales tras un descongelado de brócoli a temperatura ambiente y a temperatura de refrigeración, presentados en el trabajo de (Ramos et al, 2013), con valores de polifenoles totales más bajos. Esto debido a que el proceso de microondas se aplicó a tiempos de exposición significativamente menores a los demás métodos.

### Cuadro 3. Comparativo de concentración de polifenoles totales

Experimentales		Bibliográficos (Ramos et al, 2013)		
inicial (-12°C)	Microondas (50s, 1000W, 22°C)	Inicial (Blanqueado a 70°C por 360 s)	Temp. Ambiente (2 horas, 20°C)	Refrigeración (6 horas, 7°C)
1,118	1,112(±3)	1,229	909.61	1,115.87

## **Conclusiones**

La simulación desarrollada describe un proceso de descongelado de una muestra de brócoli, aplicable en tiempos cortos de calentamiento. Este programa puede aplicarse para cualquier tipo de alimento que se plantee como una fase sólida única.

No se observaron efectos significativos en el contenido de polifenoles totales de las muestras después del proceso de microondas, esto confirma la ventaja de esta tecnología a otros métodos de descongelado de alimentos.

El modelo planteado en este trabajo relaciona la distribución de ondas electromagnéticas y la transferencia de energía durante tiempos cortos de calentamiento, en los que se asume al producto como sólido monofásico. Aunque las suposiciones hechas en el modelamiento dan una aproximación aceptable del proceso, ignoran factores importantes en el calentamiento de alimentos por microondas como la evaporación y la transferencia de humedad, limitando significativamente su habilidad para describir completamente el proceso real de calentamiento por microondas.

El desarrollo de simulaciones como la de este trabajo permite un mejor entendimiento de la tecnología de microondas y su interacción con alimentos diseñados especialmente para su cocción por microondas y sus empaques. Estas “comidas de microondas” suelen diseñarse con métodos empíricos de cocción-medición costosos y tardados.

Así, factores importantes en el diseño como las porciones, la distribución en su empaque y los diferentes tiempos de cocción de los ingredientes, pueden ser contemplados en su diseño de manera económica y rápida.

### **Recomendaciones**

Existe un área de oportunidad para implementar modelos más descriptivos si se tiene al alcance programas con la capacidad suficiente de análisis de grandes cantidades de datos para una descripción de un proceso de descongelación más detallada.

## Referencias

- Analía, L., & Zaritzky, N. (2010). Mathematical Modeling and Simulation of Microwave Thawing of Large Solid Foods Under Different Operating Conditions. *Food Bioprocess Technology*, 3(6), 813-825.
- Arballo, J. R., Campañone, L. A., & Masheroni, R. H. (2013). Análisis de Perfiles de Temperatura Durante el Proceso de Calentamiento de Frutas por Microondas. *Mecánica Computacional*, 32, 1393-1407.
- Basak, T., & Ayappa, K. (2002). Role of Length Scale on Microwave Thawing dynamic in 2D Cylinders. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(23), 4543-4559.
- Bisbicuz, J., & Velez, C. P. (2015). *Plan Logístico para la Exportación del Brócoli desde el Puerto de Tumaco hacia EEUU*. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.
- Campañone, L., & Zaritzky, N. (2009). Mathematical Analysis of Microwave Heating Process. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 359-368.
- Campañone, L., & Zaritzky, N. (2012). Mathematical Modeling and Simulation of Microwave Thawing of Large Solid Foods Under Different Operating Conditions. *Food and Brioprocess Technology*, 3(6), 813-825.

- Cha-hum, W., Rattanadecho, P., & Pakdee, W. (2011). Experimental And Numerical Analysis of Microwave Heating of Water and Oil Using a Rectangular Wave Guide: Influence of Sample Size, Positions and Microwave Power. *Food Bioprocess Technology*, 4(4), 544-558.
- Chen, J., Pitchai, K., Birla, S., Jones, D., Negahban, M., & Subbiah, J. (2016). Modeling Heat and Mass Transport During Microwave Heating of Frozen Food Rotating on A Turntable. *Food and Bioproducts Processing*, 99, 116-127.
- Chen, J., Pitchai, K., Sohan, B., Subbiah, J., & Jones, D. (2014). *Simulation of Microwave Heating of Porous Media Coupled With Heat, Mass and Momentum Transfer*. New England: Department of Food Science and Technology, University of Nebraska-Lincoln.
- Choi, Y., & Okos, M. (1986). Effects of Temperature and Composition on Thermal Properties of Foods. *Journal of Food Process and Applications*, 1(1), 93-101.
- Choi, Y., & Okos, M. (1986). *Physical and Chemical Properties of Food*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers.
- Cleland, A., & Earle, R. (1977). A Comparison of Analytical and Numerical Methods for Predicting

the Freezing Times of Foods. *Journal of Food Science*, 1390-1395.

COMSOL. (2013). *Multiphysics*.

Comstock, S., & Owen, M. S. (2002). Thermal Properties. *ASHRAE Handbook: Refrigeration Systems*, 80-110.

Datta, A. (2008). Status of Physics-based Models in the Design of Food Products, Processes and Equipment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 121-129.

Datta, A., & Ramaswamy, C. (2001). *Handbook of Microwave Technology for Food Application*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Dixon, G. (2008). Vegetable Brassicas and Related Crucifers. *International Journal of Vegetable Science*, 300-319.

Finley, J., Ip, C., Lisk, D., Davis, C., & Hintze, K. (2001). Cancer-Protective Properties of High-Selenium Broccoli. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2679-2683.

García, E., Fernández, I., & Fuentes, A. (2011). Determinación de Polifenoles Totales. Departamento de Tecnología de Alimentos, ESTIAMN. Universitat Politècnica de València.



- Gebhardt, S. E., & Thomas, R. G. (2002). *Nutritive Value of Foods*. Maryland: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Nutrient Data Laboratory.
- Gulati, T., Datta, A., Doona, C., Ruan, R., & Feeherry, F. (2015). Modeling Moisture Migration in a Multi-Domain Food System: Application to Storage of a Sandwich System. *Food Research International*, 76(3), 427-438.
- Hinestroza, L., & al, e. (2008). *Uso de Microondas para el Calentamiento de Alimentos*. San Andreas, Cholula. Puebla: Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Universidad de las Américas.
- Koramov, V. (2012). *Handbook of Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies*. Boston: Artech House.
- Kwon, Y. W., & Bang, H. (1997). *The Finite Element Method Using Matlab*. Florida, USA: CRC press.
- Lacueva, C., Medina, A., Llorach, R., Urpi, M., Khan, N., Chiva, G., Zamora, R., Rotches, M., & Larnuela, R. (2010). Phenolic Compounds: Chemistry and Occurrence in Fruits and Vegetables. en L.A De la Rosa; E. Alvarez; G.A Gonzalez Eds. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry, Nutritional Value and Stability* (first edition), Blackwell Publishing Iowa, USA.

- León, J. A. (2016). Obtención del 3, 3'-diindolilmetano en extractos de Col de Bruselas (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) y Brócoli (*Brassica oleracea italica*). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Liu, F., Turner, I., & Bialowski, M. (1994). A Finite-Difference Time-domain Simulation of Power Density Distribution in a Dielectric Loaded Microwave Cavity. *Microwave Power Electromagnetic Energy*, 29(3), 138-147.
- Liu, S., Jin, Y., Llave, Y., & Sakai, N. (17 de Abril de 2017). Electrical Conductivity and Ohmic Thawing of Frozen Tuna at High Frequencies. *Journal of Food Engineering*, 197, 68-77.
- Lourido, F., & Garcés, C. (2010). *Apuestas Productivas para la Región Pacífico de Colombia*. Valle del Cauca: Fundación para el Desarrollo Integral del Valle de Cauca.
- Maldonado, J., Ramirez, J., Méndez, J. A., & Pérez, N. (2017). El Sistema de Producción del Brócoli Desde la Perspectiva del Campo Social de Pierre Bourdieu. *Estudios Sociales: Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 1-20.
- Metaxas, A., & Meredith, R. (1986). *Industrial Microwave Heating*. London: Institution of Engineering and Technology.

Montes Alzate, R. J. (2015). Aplicación del Programa Comsol Multiphysics en la Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Moreno, D., Carvajal, M., López, C., & Garcia, C. (2006). Chemical and Biological Characterization of Nutraceutical Compounds of Broccoli. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41(5), 1508-1522.

Pangle, B., Ayappa, K., Sutanto, E., & Davis, H. (1991). Microwave thawing of cylinders. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 37(12), 1789-1800.

Pham, T. Q. (2014). *Food Freezing and Thawing Calculations*. Sydney: Springer.

Pitchai, K., Chen, J., 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*, 128, 60-71.

Puri, V., & Anantheswaran, R. (1993). Finite Element Method in Food Processing; a Review. *Journal of Food Engineering*, 19(3), 247-274.

Quiñones, M., Alexandre, A., & Miguel, M. (2012). Los Polifenoles, Compuestos de Origen Natural con Efectos Saludables Sobre el Sistema Cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria. Departamento de Farmacología. Facultad*

*de Medicina. Universidad Complutense, Madrid. 27(1), 76-89.*

Ramirez Juidias, E., & León, Bonillo, M.J. (2000). Predicción de Tiempos de Congelación y Descongelación de Alimentos. Escuela Universitaria Técnica Agrícola de la Universidad de Sevilla. C.P. 41013, Sevilla.

Saltiel, C., & Datta, A. (1999). Heat and Mass Transfer in Microwave Processing. *Advances in Heat Transfer*, 33, 1-94.

Sagarpa-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2011) "Monografía de Cultivos: Brócoli. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios (SFA)" Gobierno Federal, México.

Sagarpa-Siap Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación "Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2010)" Gobierno Federal, México, pp. 22-42.

Siap-Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2016)

Schlegel, W. (1992). Commercial Pasteurization and Sterilization of Food Products Using Microwave Technology. *Food Technology*, 46(12), 62-63.

Sears, F., & Zemansky, W. (2009). *Física Universitaria*. Pearson Educación.

- Sosa, M., Valeria, L., López, A., & García, H. (2010). Dielectric properties of Foods: Reported Data in the 21st Century and Their Potential Applications. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie Journal*, 43(8), 1169-1179.
- Tchigeov, G. (1956). *Problems of the Theory of Food Freezing*. Moscow: Food Industry.
- Tchigeov, G. (1979). *Thermophysical Processes in Food Refrigeration Technology*. Moscow: Food Industry.
- Tilford, T., Baginski, E., Kelder, J., Parrott, K., & Pericleous, K. (2006). Microwave Modeling and Validation in Food Thawing Applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 41(4), 30-45.
- Whiteley, J. (2017). *Finite Element Methods: A Practical Guide*. Oxford: Springer.
- Zienkiewics, O., & Taylor, R. (2000). *The Finite Element Method, vol 1: The Basis*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

## **Anexo 1.**

### **Cálculo de propiedades térmicas de brócoli congelado.**

Se desarrolló una aplicación en lenguaje Java para el cálculo de las propiedades termo-físicas de muestra en la simulación, con el módulo JFrame (Figura 27). Esta aplicación se programó de manera que agilice la obtención de datos de las propiedades de calor específico, densidad, difusividad térmica y conductividad térmica de un alimento utilizando los modelos matemáticos (tabla 4.) desarrollados por (Choi & Okos, 1986) los cuales predicen las propiedades térmicas de los componentes químicos tales como proteínas, lípidos, contenido de agua, carbohidratos, fibra y cenizas, en función de la temperatura en un intervalo de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ ; el usuario únicamente ingresa datos de temperatura y composición química del alimento.

Para este trabajo se utilizaron datos de la composición química de brócoli congelado a  $-12^{\circ}\text{C}$ , reportadas en (Gebhardt & Thomas, 2002).



Figura 27. Aplicación para el cálculo de propiedades térmicas de alimentos

Cuadro 4. Modelos de propiedades térmicas de componentes de alimentos (Choi & Okos, 1986).

Propiedad Térmica	Componente del alimento	Modelo de propiedad térmica
Conductividad Térmica ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )	Proteína	$k = 1.7881x10^{-1} + 1.1958x10^{-3}t - 2.7178x10^{-6}t^2$
	Lípidos	$k = 1.8071x10^{-1} - 2.7604x10^{-3}t - 1.7749x10^{-6}t^2$
	Carbohidratos	$k = 2.0141x10^{-1} + 1.3874x10^{-3}t - 4.3312x10^{-6}t^2$
	Fibra	$k = 1.8331x10^{-1} + 1.2497x10^{-3}t - 3.1683x10^{-6}t^2$
	Cenizas	$k = 3.2962x10^{-1} + 1.4011x10^{-3}t - 2.9069x10^{-6}t^2$
Difusividad Térmica ( $\frac{m^2}{s}$ )	Proteína	$\alpha = 6.8714x10^{-8} + 4.7578x10^{-10}t - 1.4646x10^{-12}t^2$
	Lípidos	$\alpha = 9.8777x10^{-8} - 1.2569x10^{-10}t - 3.8286x10^{-12}t^2$

	Carbohidratos	$\alpha = 8.0842x10^{-8} + 5.3052x10^{-10}t - 2.3218x10^{-12}t^2$
	Fibra	$\alpha = 7.3976x10^{-8} + 5.1902x10^{-10}t - 2.2202x10^{-12}t^2$
	Cenizas	$\alpha = 1.2438x10^{-7} + 3.7321x10^{-10}t - 1.2244x10^{-12}t^2$
Densidad ( $\frac{kg}{m^3}$ )	Proteína	$\rho = 1.3299x10^3 + 5.1840x10^{-1}t$
	Lípidos	$\rho = 9.2559x10^2 - 4.1757x10^{-1}t$
	Carbohidratos	$\rho = 1.5991x10^3 - 3.1046x10^{-1}t$
	Fibra	$\rho = 1.3115x10^3 - 3.6589x10^{-1}t$
	Cenizas	$\rho = 2.4238x10^3 - 2.8063x10^{-1}t$
Calor específico ( $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ )	Proteína	$Cp = 2.0082 + 1.2089x10^{-3}t - 1.3129x10^{-6}t^2$
	Lípidos	$Cp = 1.9841 + 1.4733x10^{-3}t - 4.8008x10^{-6}t^2$
	Carbohidratos	$Cp = 1.5488 + 1.9625x10^{-3}t - 5.9399x10^{-6}t^2$
	Fibra	$Cp = 1.8459 + 1.8306x10^{-3}t - 4.6509x10^{-6}t^2$
	Cenizas	$Cp = 1.0926 + 1.8896x10^{-3}t - 3.6817x10^{-6}t^2$



## Anexo 2.

### Cálculo de propiedades dieléctricas de brócoli congelado.

Para el cálculo de la constante dieléctrica y el factor de pérdida requeridas en la simulación se aplicaron las ecuaciones planteadas por (Koramov, 2012) para floretes de brócoli congelado comercial, las cuales describen el comportamiento no lineal de éstas propiedades con respecto a la temperatura (Cuadro 5).

#### Cuadro 5. Modelo para el cálculo de propiedades dieléctricas para floretes de brócoli congelado comercial.

Expresión	R <sup>2</sup>
$\epsilon'(T) = -0.0005129T^2 - 0.1208T + 74.18$ $\epsilon'(-12^{\circ}C) = 75.55$	0.989
$\epsilon''(T) = 0.001174T^2 - 0.0242T + 20.89$ $\epsilon''(-12^{\circ}C) = 21.34$	0.915