



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de la transferencia de calor y masa durante el  
secado de productos alimenticios utilizando microondas**

Trabajo de Investigación para optar el Grado de  
Bachiller en Ingeniería Mecánico - Eléctrica

**José Alonso Gonzales Fernández  
Jorge Eduardo Guerrero Bardales  
Adrián Ibraín Holguín Jiménez  
Fernando Javier Machacuay Vera**

**Asesor:  
Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Piura, setiembre de 2020**



## Resumen Analítico-Informativo

**Análisis de la transferencia de calor y masa durante el secado de productos alimenticios utilizando microondas**

**José Alonso Gonzales Fernández, Jorge Eduardo Guerrero Bardales, Adrián Ibraín Holguín Jiménez, Fernando Javier Machacuay Vera**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Trabajo de investigación.**

**Bachiller en Ingeniería Mecánico-Eléctrica**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, setiembre de 2020**

**Palabras claves:** calor, masa, microondas, modelo, papa, secado, simulación, transferencia.

**Introducción:** Dentro del ámbito del secado de productos alimenticios, existe la necesidad de comprender, modelar, analizar y evaluar los procesos o los fenómenos físicos involucrados en el secado por microondas de la papa. Por ello, el presente estudio recoge los resultados y metodologías de diversas investigaciones realizadas proponiendo un modelo matemático para dicho análisis. A su vez, mediante el software Ansys® Workbench, el presente trabajo busca proporcionar un método de modelado basado en las herramientas del software; por lo que da pie a múltiples investigaciones relacionadas directa o indirectamente al proceso de secado de productos alimenticios por medio de microondas.

**Metodología:** Se recopiló información relacionada a estudios realizados sobre el secado de microondas de diversos productos alimenticios para posteriormente tener una base sólida de datos científicos y empíricos para realizar el modelado matemático y la simulación pertinente del secado de muestras de papa a través de un horno microondas. Posteriormente se realizó el análisis de los fenómenos de transferencia de calor y masa del sistema identificando las variables de interés y propiedades características, como la humedad, temperatura, difusividad, etc., para su respectiva validación con aquellos datos que figuran en la bibliografía científica disponible. Asimismo, se verificó el predominio de uno de los fenómenos mencionados sobre el otro bajo ciertas condiciones y consideraciones a través de la simulación realizada a través del software Ansys®.

**Resultados:** Se obtuvo un modelo matemático capaz de calcular la influencia de la temperatura en la muestra a través del tiempo y la validación de los datos recogidos en las investigaciones anteriores a través de tres simulaciones realizadas en el software Ansys®: flujo de calor, temperatura y fracción de volumen de agua en estado líquido y gaseoso.

**Conclusiones:** El secado con microondas no es suficientemente efectivo para aplicaciones de procesos industriales, sino que tiene complementarse con otros elementos para aumentar su eficiencia. Además, las consideraciones realizadas se orientan hacia un análisis ideal y controlado de los parámetros tanto de la muestra como del ambiente.

**Fecha de elaboración del resumen:** agosto de 2020

## Analytical-Informative Summary

### **Análisis de la transferencia de calor y masa durante el secado de productos alimenticios utilizando microondas**

**José Alonso Gonzales Fernández, Jorge Eduardo Guerrero Bardales, Adrián Ibraín Holguín Jiménez, Fernando Javier Machacuay Vera**

**Asesor(es): Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana**

**Trabajo de investigación.**

**Bachiller en Ingeniería Mecánico-Eléctrica**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, setiembre de 2020**

**Keywords:** heat, mass, microwave, model, potato, drying, simulation, transfer.

**Introduction:** In the field of drying food products, there is a need to understand, model, analyze and evaluate the processes or physical phenomena involved in microwave drying of potatoes. For this reason, this study collects the results and methodologies of various investigations carried out proposing a mathematical model for said analysis. Likewise, through the Ansys® Workbench software, the present work seeks to provide a modeling method based on the software tools; therefore, it gives rise to multiple investigations related directly or indirectly to the process of microwave drying of food products.

**Methodology:** Information related to studies carried out on microwave drying of various food products was collected to subsequently have a solid base of scientific and empirical data to develop the mathematical modeling and the pertinent simulation of the drying of potato samples through a microwave oven. Subsequently, the analysis of the heat and mass transfer phenomena of the system was carried out, identifying the variables of interest and characteristic properties, such as humidity, temperature, diffusivity, etc., for their respective validation with those data that appear in the available scientific literature. Also, the predominance of one of the previously mentioned phenomena over the other was verified under certain conditions and considerations through the simulation carried out through Ansys®.

**Results:** A mathematical model capable of calculating the influence of temperature on the sample over time was obtained and the validation of the data collected in previous investigations was carried out through three simulations in Ansys®: heat flow, temperature and volume fraction of water in liquid and gaseous state.

**Conclusions:** Microwave drying is not effective enough for industrial process applications but has to be complemented with other elements to increase its efficiency. In addition, the considerations made are oriented towards an ideal and controlled analysis of the parameters of both the sample and the environment.

**Summary date:** august 2020

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>Introducción</b> .....  | 1  |
| <b>Justificación y objetivos</b> .....   | 3  |
| <b>Capítulo 1 Marco teórico y estado del arte</b> .....                            | 5  |
| 1.1. Microondas .....  | 5  |
| 1.2. Calentamiento dieléctrico .....   | 5  |
| 1.3. Propiedades dieléctricas .....  | 6  |
| 1.4. Transferencia de calor y masa .....   | 7  |
| 1.4.1. Mecanismos de transferencia de calor en la muestra.....                     | 8  |
| 1.4.2. Mecanismos de transferencia de masa .....                                   | 11 |
| 1.4.3. Curvas de secado.....   | 15 |
| 1.5. Parámetros de transporte .....  | 19 |
| 1.5.1. Humedad relativa y humedad absoluta .....                                   | 19 |
| 1.5.2. Presión de vapor saturado, calor latente de vaporización y específico ..... | 19 |
| 1.5.3. Masa seca ( $m_s$ ) y velocidad de secado ( $w_D$ ).....                    | 21 |
| 1.5.4. Conductividad térmica .....   | 21 |
| 1.5.5. Difusividad .....   | 22 |
| 1.6. Ecuaciones auxiliares .....   | 23 |
| 1.6.1. Ecuación de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB).....                          | 23 |
| 1.6.2. Analogía calor-masa.....  | 24 |
| 1.7. Estado del arte .....   | 24 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo 2 Análisis del sistema</b> .....                                    | 29 |
| 2.1. Descripción analítica .....  | 29 |
| 2.2. Análisis matemático .....  | 32 |
| 2.2.1. Planteamiento del modelo .....   | 32 |
| 2.2.2. Consideraciones de análisis.....   | 33 |
| 2.2.3. Parámetros .....   | 36 |
| 2.2.4. Cálculos analíticos.....   | 39 |
| <b>Capítulo 3 Modelación y resultados: Simulación en Ansys® Workbench</b> ..... | 43 |
| 3.1. Consideraciones .....  | 43 |
| 3.1.1. Consideraciones geométricas de la muestra.....                           | 43 |
| 3.1.2. Consideraciones en las propiedades para la muestra .....                 | 44 |
| 3.1.3. Mallado del elemento .....   | 45 |
| 3.1.4. Consideraciones de la simulación de temperatura y flujo interno .....    | 46 |
| 3.1.5. Consideraciones de la simulación cambio de fase .....                    | 49 |
| 3.2. Resultados.....  | 55 |
| 3.2.1. Temperatura .....  | 55 |
| 3.2.2. Flujo de calor.....  | 55 |
| 3.2.3. Fracción de volumen de agua en estado líquido y gaseoso .....            | 56 |
| <b>Capítulo 4 Discusión de resultados</b> .....                                 | 59 |
| 4.1. Evaluación de parámetros definidos.....                                    | 59 |
| 4.1.1. Temperatura .....  | 59 |
| 4.1.2. Volumen de agua en estado líquido .....                                  | 59 |
| 4.1.3. Volumen de agua en estado gaseoso .....                                  | 59 |
| 4.2. Justificación de resultados .....  | 60 |
| <b>Conclusiones</b> .....   | 61 |
| <b>Recomendaciones</b> .....  | 63 |
| <b>Referencias bibliográficas</b> .....   | 65 |

**Anexos** ..... 69





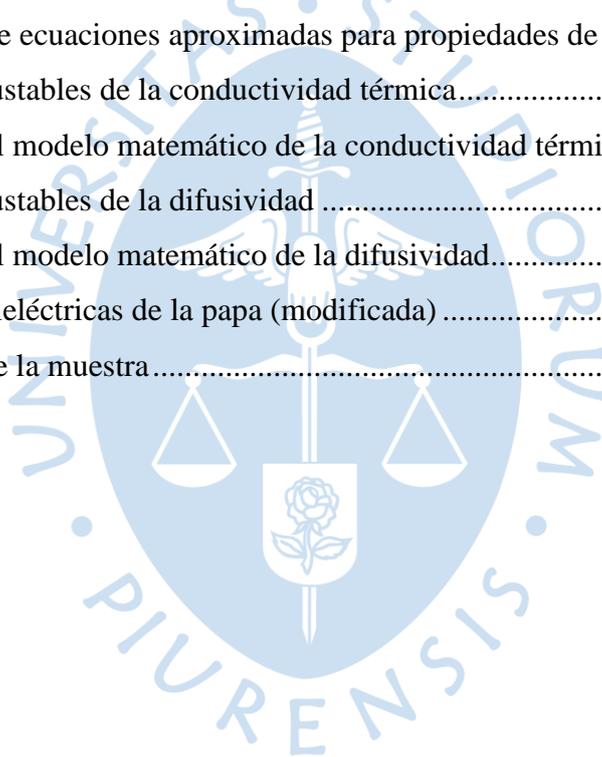
## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Espectro electromagnético .....  | 5  |
| Figura 2 Gradientes por calentamiento convencional y por calentamiento con microondas ..... | 6  |
| Figura 3 Curva de velocidad de secado típica, condiciones de secado constantes .....        | 16 |
| Figura 4 Ejemplos de curvas de secado normalizadas para diferentes tipos de medios .....    | 17 |
| Figura 5 Rapidez de secado de una muestra de ñame de 50 gramos .....                        | 18 |
| Figura 6 Variedades de papa amarga .....  | 29 |
| Figura 7 Diagrama esquemático de un secador microondas .....                                | 31 |
| Figura 8 Especificaciones horno Samsung MG1045 .....  | 32 |
| Figura 9 Difusividades a temperatura ambiente y humedad variable .....                      | 34 |
| Figura 10 Difusividades a temperatura 10°C y humedad variable .....                         | 35 |
| Figura 11 Difusividades a temperatura 125°C y humedad variable .....                        | 35 |
| Figura 12 Modelación de la geometría para muestra en Ansys® Workbench 2019.....             | 43 |
| Figura 13 Vista isométrica de sección - papa en cavidad de horno microondas.....            | 44 |
| Figura 14 Vista frontal en sección - papa en cavidad de horno .....                         | 44 |
| Figura 15 Configuración de los valores para la pieza de papa en módulo de material .....    | 45 |
| Figura 16 Mallado de elemento para simulación de radiación.....                             | 46 |
| Figura 17 Asignación de propiedades de Papa Peruana a elemento de prueba.....               | 46 |
| Figura 18 Asignación de valor para temperatura inicial .....                                | 47 |
| Figura 19 Determinación del tiempo para simulación .....                                    | 47 |
| Figura 20 Parámetros para la simulación del fenómeno de radiación.....                      | 48 |
| Figura 21 Configuración de caras para la radiación bajo el método Surface to Surface .....  | 48 |
| Figura 22 Parámetros para la simulación del fenómeno de generación interna de calor .....   | 49 |
| Figura 23 Ventana de herramienta FLUID FLOW .....   | 49 |
| Figura 24 Zonas definidas para simulación en modulo Fluent .....                            | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 25 Reelaboración de malla para simulación en modulo Fluent .....                 | 51 |
| Figura 26 Configuración inicial para modelo multifase.....                              | 51 |
| Figura 27 Configuración de parámetro para fase agua líquida .....                       | 52 |
| Figura 28 Configuración de parámetro para fase vapor de agua.....                       | 52 |
| Figura 29 Configuración de parámetro para cambio de fase 1 a 2.....                     | 52 |
| Figura 30 Configuración de propiedades para cambio de fase 1 a 2.....                   | 52 |
| Figura 31 Configuración de parámetro para tensión superficial .....                     | 53 |
| Figura 32 Configuración de los parámetros en el módulo Energy y Viscous Model .....     | 53 |
| Figura 33 Configuración de parámetro para porcentaje de porosidad .....                 | 54 |
| Figura 34 Configuración parámetro flujo de calor .....                                  | 54 |
| Figura 35 Configuración de parámetros en pared para muestra de papa .....               | 54 |
| Figura 36 Perfil de temperaturas para la pieza de papa.....                             | 55 |
| Figura 37 Gráfica Temperatura vs tiempo para la pieza de papa.....                      | 55 |
| Figura 38 Perfil de flujo de calor total en la pieza de papa.....                       | 56 |
| Figura 39 Gráfica Flujo de calor vs tiempo para pieza de papa.....                      | 56 |
| Figura 40 Fracción de agua en estado líquido para el instante inicial.....              | 56 |
| Figura 41 Fracción de agua en estado líquido luego de aproximadamente 220 segundos..... | 57 |
| Figura 42 Fracción de agua líquida en las paredes de la cavidad .....                   | 57 |
| Figura 43 Fracción de vapor de agua en los primeros segundos.....                       | 57 |
| Figura 44 Fracción de vapor luego de aproximadamente 220 segundos .....                 | 58 |
| Figura 45 Zona cavidad de horno.....  | 76 |
| Figura 46 Zona de pared lateral de papa .....   | 76 |
| Figura 47 Zona pared inferior de papa .....   | 76 |

### Lista de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Coeficientes aproximados para propiedades de líquidos seleccionados .....         | 20 |
| Tabla 2 Coeficientes de ecuaciones aproximadas para propiedades de gases seleccionados .. | 21 |
| Tabla 3 Parámetros ajustables de la conductividad térmica.....                            | 22 |
| Tabla 4 Parámetros del modelo matemático de la conductividad térmica.....                 | 22 |
| Tabla 5 Parámetros ajustables de la difusividad .....                                     | 23 |
| Tabla 6 Parámetros del modelo matemático de la difusividad.....                           | 23 |
| Tabla 7 Propiedades dieléctricas de la papa (modificada) .....                            | 37 |
| Tabla 8 Propiedades de la muestra.....  | 45 |





## Nomenclatura

|              |  |           |  |
|--------------|--|-----------|--|
| $a_v$        | Área interfacial característica por unidad de volumen de secado, l/m         | $k_Y$     | Coefficiente de transferencia de masa, kg/(m <sup>2</sup> s)   |
| $a_w$        | Actividad acuosa   | $L$       | Longitud, m  |
| $A$          | Área total de la muestra, m <sup>2</sup>                                     | $m$       | Masa de la muestra, kg   |
| $b_i$        | Constantes en ecuación de GAB  | $m_h$     | Contenido de masa húmeda de la muestra, kg                     |
| $Bi$         | Número de Biot   | $m_{XY}$  | Curva local de pendiente de equilibrio                         |
| $Bi_D$       | Número de Biot modificado  | $M$       | Masa molar, kg/kmol o kg/mol                                   |
| $c$          | Velocidad de la luz en espacio libre, m/s                                    | $n$       | Dirección normal de la superficie                              |
| $c$ o $c_P$  | Calor específico, J/(kg-K) o kJ/(kg-K)                                       | $N_{dif}$ | Flujo molar de difusión, mol m/s                               |
| $C$          | Concentración, mol/m <sup>3</sup>  | $N_V$     | Velocidad de secado para una superficie, kg/(m <sup>2</sup> s) |
| $D$          | Difusividad, m/s   | $N_W$     | Velocidad inicial de secado, kg/(m <sup>2</sup> s)             |
| $D_A$        | Difusividad del vapor en el aire en ausencia de medios porosos, m/s          | $p$       | Presión de vapor, Pa   |
| $D_{AB}$     | Coefficiente de difusión de masa, m <sup>2</sup> /s                          | $P$       | Presión parcial, Pa  |
| $D_P$        | Profundidad de penetración, m  | $P$       | Potencia de salida del microondas, W                           |
| $D_O$        | Factor de Arrhenius, m <sup>2</sup> /s                                       | $P_T$     | Presión total, Pa  |
| $e$          | Coefficiente de evaporación  | $P_W^0$   | Presión de vapor saturado a una temperatura T, Pa              |
| $E_a$        | Energía de activación, kJ/kmol   | $q$       | Flujo de calor, K W/m <sup>2</sup>                             |
| $E_{rms}$    | Módulo del campo eléctrico oscilante, V/m                                    | $q_{gen}$ | Calor generado, W/m <sup>3</sup>                               |
| $E(X)$       | Módulo del campo eléctrico en función del contenido de humedad, V/m          | $r, R$    | Radio, m   |
| $E_0$        | Módulo máximo considerado del campo eléctrico, V/m                           | $R$       | Constante de gas ideal, kJ/(mol K)                             |
| $f$          | Frecuencia, Hz   | $t$       | Tiempo, s  |
| $f_{sc}$     | Velocidad de secado característica   | $T$       | Temperatura, K   |
| $f_r$        | Factor de fricción   | $V$       | Volumen total, m <sup>3</sup>                                  |
| $FO, \tau^*$ | Número de Fourier  | $V_a$     | Velocidad, m/s   |
| $h$          | Coefficiente de convección, W/m <sup>2</sup> K                               | $w$       | Fracción de masa de la muestra                                 |
| $h_{calor}$  | Coefficiente de transferencia de calor, kW/(m <sup>2</sup> -K)               | $w_D$     | Velocidad de secado, kg/(m <sup>2</sup> s)                     |
| $h_{masa}$   | Coefficiente de transferencia de masa, kg/(m <sup>2</sup> K)                 | $X$       | Contenido de humedad en base seca                              |
| $H$          | Entalpía, J/kg   | $X_c$     | Contenido de humedad en base seca crítica, kg/kg               |
| $i_g$        | Definición de entalpía de gas húmedo (por unidad de masa de gas seco), kJ/kg | $y$       | Fracción molar   |
| $k$          | Conductividad térmica del material, W/m K                                    | $Y$       | Humedad absoluta (relación de masa vapor / gas seco)           |

## Letras griegas

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\alpha$                | Difusividad térmica del material, $m^2/s$                                |
| $\delta$                | Constricción <sup>1</sup> .  |
| $\Delta h_v$            | Calor latente de vaporización, kJ/kg                                     |
| $\Delta H_{ev}$         | Entalpía de vaporización, J/kg   |
| $\varepsilon$           | Permitividad, F/m  |
| $\varepsilon'$          | Constante dieléctrica, F/m   |
| $\varepsilon''$         | Factor de pérdidas dieléctricas, F/m                                     |
| $\varepsilon''_{total}$ | Factor de pérdidas dieléctricas total, F/m                               |
| $\varepsilon''(X)$      | Factor de pérdidas dieléctricas en función del contenido de humedad, F/m |
| $\varepsilon_r$         | Permitividad relativa,   |
| $\varepsilon_v$         | Porosidad  |
| $\varepsilon_0$         | Permitividad del vacío, F/m  |
| $\varepsilon_{rad}$     | Emisividad   |
| $\theta$                | Temperatura adimensional   |
| $\nu$                   | Viscosidad cinemática, $m^2/s$   |
| $\rho$                  | Densidad, $kg/m^3$   |
| $\sigma$                | Conductividad eléctrica, $\Omega^{-1} m^{-1}$                            |
| $\sigma_{rad}$          | Constante de Stefan-Boltzmann  |
| $\tau$                  | Tortuosidad <sup>2</sup>   |
| $\Phi$                  | Contenido de humedad   |

|           |                                      |
|-----------|--------------------------------------|
| $\phi$    | Contenido característico de humedad  |
| $\varphi$ | Humedad relativa                     |
| $\psi$    | Humedad relativa a una temperatura T |
| $\zeta$   | Relación de radios                   |
| $\xi$     | Variable de semejanza                |

## Subíndices

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| $o, 0, i$    | Magnitud o valor inicial |
| <i>alred</i> | Alrededores              |
| <i>A</i>     | Muestra                  |
| <i>B</i>     | Gas seco                 |
| <i>eff</i>   | Magnitud efectiva        |
| <i>G</i>     | Gas seco                 |
| <i>m</i>     | Cantidad media           |
| <i>ref</i>   | Referencia               |
| <i>s</i>     | Superficie               |
| <i>s</i>     | Saturación               |
| <i>S</i>     | Masa seca                |
| <i>v</i>     | Magnitud interna         |
| <i>W</i>     | Humedad o vapor de agua  |
| $\infty$     | Medio circundante        |

## Superíndices

|   |                        |
|---|------------------------|
| * | En equilibrio          |
| — | (Raya arriba) Promedio |

<sup>1</sup> Desaceleración de la difusión al aumentar la viscosidad en poros.

<sup>2</sup> Cociente entre la longitud de las canales en el medio poroso y la longitud del lecho.

## **Introducción**

El secado industrial de productos alimenticios, como la papa, es una técnica utilizada en diversos sectores de la producción, no obstante, este proceso en sí no es innovador ya que desde tiempos remotos se aplicaba el secado para el consumo alimenticio; sin embargo, la técnica ha sido desarrollada en los últimos tiempos teniendo distintas formas de llevarse a cabo y siempre orientada al mayor beneficio y menor costo, lo cual implica una mejor eficiencia energética del proceso y menores tiempos de secado, y una de estas formas es por radiación microondas, la cual permite un control más sofisticado de la humedad final de una muestra y la remoción de cantidades pequeñas de humedad en zonas complicadas de la misma, ya que el principio de funcionamiento de esta técnica es un calentamiento volumétrico que se produce al interior de esta.

El agua se encuentra en gran cantidad en los alimentos e influye en la apariencia, textura y sabor, pero también afecta directamente a la conservación, porque permite el desarrollo de microorganismos patógenos, por tanto, la disminución de humedad en un producto agrícola permite alargar el tiempo que este producto se mantiene en condiciones aptas para el consumo humano.

Sin embargo, las técnicas innovadoras deben estar respaldadas por una base científica que avale su uso y gracias al avance tecnológico, gran parte de ellas se pueden simular en un entorno virtual, siendo posible verificar su fiabilidad y aplicación sin generar riesgos o pérdidas de algún tipo.



## **Justificación y objetivos**

Este trabajo de investigación se realiza por la necesidad de comprender, modelar, analizar y evaluar los procesos o los fenómenos físicos involucrados en el secado por microondas de la papa a través del planteamiento de un modelo matemático basado en investigaciones ya realizadas, y cuya validez se tratará de comprobar a través de simulaciones, las cuales permitirán obtener un alcance aproximado de los resultados que se esperan si este proceso se realizara de manera experimental. Además, la búsqueda de fuentes científicas y herramientas se justifica como respaldo del estudio a realizar.

Dada la reducida cantidad de trabajos relacionados al modelado de este proceso a través del software Ansys® Workbench, el presente trabajo busca proporcionar un método de modelado basado en las herramientas del software; por lo que da pie a múltiples investigaciones relacionadas directa o indirectamente al proceso de secado de productos alimenticios por medio de microondas.

El objetivo principal que se pretende lograr en la presente investigación es realizar un estudio sobre los fenómenos de transferencia de calor y masa que se dan durante el secado de papa por microondas mediante el planteamiento de un modelo matemático y la simulación de este proceso a través del software Ansys® Workbench, y validar todos los resultados con aquellos obtenidos por otras investigaciones. Entre otros objetivos se pretende el aprendizaje con la herramienta Ansys® Workbench, realizar un análisis exhaustivo de los fenómenos de transferencia de calor y masa en el secado por microondas, y hacer una comparativa de los resultados obtenidos por el software con resultados de investigaciones anteriores. Al hacer uso de un software libre, se puede dar un alcance general de resultados esperados sin tener que realizar una inversión económica relevante.



## Capítulo 1

### Marco teórico y estado del arte

#### 1.1. Microondas

Las microondas son una radiación electromagnética no ionizante que ocupa en el espectro una banda de frecuencias que abarca desde los 300 MHz hasta los 300 GHz, la cual está limitada por el infrarrojo lejano y las radiofrecuencias. Poseen longitudes de onda que van desde 1 m hasta 1 mm tal como se muestra en la figura 1. (Menéndez J. Á., 2017)

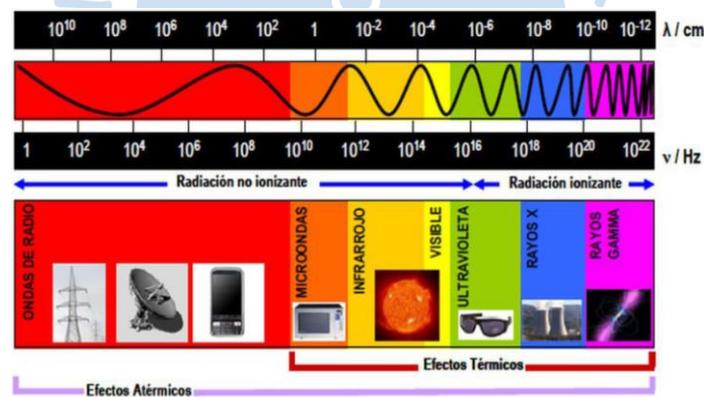


Figura 1 Espectro electromagnético

Fuente: Tomado de "Introducción al calentamiento microondas"

(Menéndez J. Á., 2017)

#### 1.2. Calentamiento dieléctrico

Al ser las microondas una radiación electromagnética implica que son una combinación de un campo eléctrico y magnético, que se auto propaga a través del espacio transportando energía de un sitio a otro (Menéndez J. Á., 2017). Esta energía de las microondas tiene la capacidad de penetrar en el interior de una muestra e inducir un calentamiento denominado calentamiento dieléctrico.

El componente eléctrico de dicha radiación es el que provoca el calentamiento por medio de dos mecanismos: la rotación dipolar y la conducción iónica.

La rotación dipolar es una interacción en que las moléculas polares intentan alinearse sobre sí mismas a medida que el campo eléctrico de la radiación de microondas oscila. Este movimiento rotacional para reorientarse consigue una transferencia de energía por fricción molecular. La conducción iónica tiene lugar cuando hay iones o especies iónicas libres en la disolución, que en presencia del campo eléctrico de la radiación intentan orientarse de forma análoga a la rotación dipolar. El resultado es un calentamiento localizado de forma instantánea. (Grupo GIDOLQUIM, 2014)

En un proceso de calentamiento por microondas la radiación incide directamente en las moléculas del interior del medio (un alimento, una disolución acuosa o un medio de reacción) produciéndose un calentamiento interno que conduce a un aumento rápido de la temperatura que se propagará de dentro hacia fuera como se ve en la figura 2. (Grupo GIDOLQUIM, 2014)

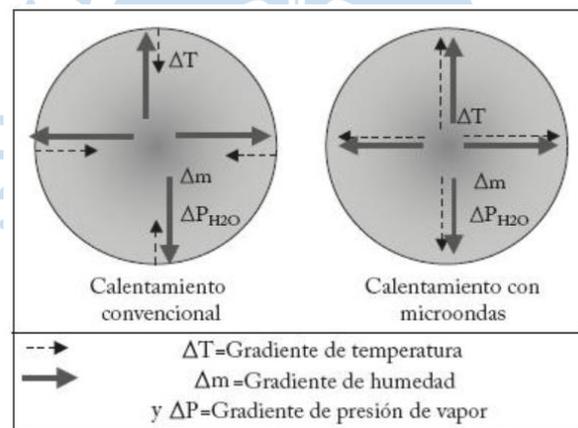


Figura 2 Gradientes por calentamiento convencional y por calentamiento con microondas

Fuente: Tomado de "El uso de las microondas en la industria farmacéutica" (Correa & Hernández, 2011)

### 1.3. Propiedades dieléctricas

El grado de conversión de energía electromagnética en calor es dependiente de la permitividad  $\varepsilon$  la cual es un número complejo, con una parte real (la constante dieléctrica) y otra imaginaria (el factor de pérdidas dieléctricas) como indica la ecuación 1. (Correa & Hernández, 2011)

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

La constante dieléctrica representa la habilidad de un material para polarizarse por efecto de un campo externo y proporciona una medida de la densidad energética de las microondas. Se expresa frecuentemente relativa a la permitividad en el vacío según la ecuación 2. (Correa & Hernández, 2011)

$$\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2)$$

La componente imaginaria de la permitividad representa la energía disipada en el material en forma de calor, y por la que se produce una atenuación del campo aplicado. Habitualmente se expresa de manera relativa a la constante dieléctrica en la forma de la tangente de pérdidas como se expresa en la ecuación 3. (Correa & Hernández, 2011)

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3)$$

El factor de pérdidas dieléctricas considera los efectos de la conducción eléctrica cuando hay dieléctricos con cargas libres, teniendo un factor de pérdidas dieléctricas total como se indica en la ecuación 4.

$$\varepsilon''_{total} = \varepsilon'' + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (4)$$

Los materiales no polares (aire, teflón, cuarzo, vidrio; por ejemplo) no pueden convertir la energía de microondas en calor. Las microondas pasan a través de estos materiales y no se debilitan. (Correa & Hernández, 2011)

Para cada material la constante dieléctrica y el factor de pérdidas dieléctricas determinan la profundidad de penetración de las microondas y la cantidad de potencia absorbida efectivamente en el material. La profundidad de penetración está dada por la ecuación 5. (Sutar & Prasad, 2008)

$$D_p = \frac{c}{2\pi f} \left\{ 2\varepsilon' \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

#### 1.4. Transferencia de calor y masa

El proceso de secado incluye en simultáneo un proceso de transferencia de calor, en el que el calor se transfiere al sólido húmedo con el fin de evaporar el líquido, y un proceso de

transferencia de masa, en el cual el líquido o vapor se mueve dentro del sólido y el vapor sale de la superficie sólida. (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

En el caso del secado asistido por microondas dicho proceso (mecanismo) de transferencia de calor es el de radiación en el que las microondas con determinada frecuencia lo suficientemente alta calientan el sólido de manera volumétrica reduciendo así la resistencia interna del material a la transferencia de calor. La energía es absorbida por las moléculas de agua de manera selectiva: mientras más seca esté la muestra, menor energía se utiliza (Mujumdar, 2006). Sin embargo, en la muestra ocurren otros procesos de transferencia de calor que se detallan a continuación.

#### 1.4.1. Mecanismos de transferencia de calor en la muestra

En el secado de microondas se producen los 3 mecanismos de transferencia de calor en la muestra: conducción (dentro de la muestra), convección (en la superficie, si no hay vacío), y radiación (en la superficie); pero esta última suele ser despreciable en comparación a las otras dos. Sin embargo, el fenómeno de convección se puede considerar despreciable debido a que el sistema físico del horno microondas casero no cuenta con dispositivo alguno que genere movimiento del aire dentro del mismo (un ventilador, por ejemplo).

##### 1.4.1.1. Conducción

La ecuación que gobierna la conducción de calor al interior de la muestra es la ecuación 6. (ecuación de Fourier – Biot)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_T \nabla T) + \dot{q}_{gen} \quad (6)$$

La potencia por unidad de volumen que proporcionan las microondas, que sería el calor generado en la muestra, viene dada por la ecuación 7:

$$\dot{q}_{gen} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}_{rms}|^2 \quad (7)$$

Si  $k_T$  se considera constante la ecuación 6 se reduce a la ecuación 8. Por otro lado, el gradiente de temperatura se desarrolla en la ecuación 9.

$$\frac{\rho c_p}{k_T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{\dot{q}_{gen}}{k_T} \quad (8)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

Sin embargo, la ecuación 8 no está considerando los fenómenos de la transferencia de masa; por ende, se deberá modificar la ecuación para considerar este efecto, haciendo algunas consideraciones antes de ello: (Plaza, 2015)

- No se produce condensación sobre la superficie del material ni en el interior del equipo.
- La resistencia al flujo de masa es despreciable debido a que los materiales tratados son porosos y muy delgados. La difusión de humedad lateralmente entre puntos adyacentes también se considera despreciable.
- Las pérdidas dieléctricas del cuerpo disminuyen según el contenido de humedad se reduce, siguiendo una relación lineal. Esto se debe a que, según evoluciona el proceso de secado, los materiales cambian de propiedades debido al cambio en su contenido de humedad.

Teniendo en cuenta las consideraciones hechas, la ecuación de la conducción de calor incluye un nuevo término, y el calor generado por las microondas ahora es dependiente de la humedad, como se expresa en la ecuación 10

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_T \nabla T) + 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(X) |\vec{E}_{rms}(X)|^2 + \rho e_v \Delta H_{ev} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (10)$$

El nuevo término representa el calor perdido por la evaporación de la humedad al interior de la muestra. Si se hace la suposición de  $k_T$  constante y se divide todo entre  $\rho c_p$ , se obtiene la ecuación 11.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(X) |\vec{E}_{rms}(X)|^2}{\rho c_p} + \frac{e_v}{c_p} \Delta H_{ev} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (11)$$

El contenido de humedad es en base seca siguiendo la ecuación 12. (Wikipedia, s.f.):

$$X = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (12)$$

En lo referente al modelo electromagnético del equipo se hace la aproximación de que existe un campo eléctrico que es constante sobre toda la muestra, aunque evoluciona a lo largo

del proceso. La expresión que se utiliza para modelar este comportamiento es la ecuación 13. (Plaza, 2015)

$$|\vec{E}_{rms}(X)| = E(X) = \frac{E_0}{\sqrt{\varepsilon''(X)}} \quad (13)$$

#### 1.4.1.2. Condiciones de frontera

De manera general, una muestra en un horno microondas que no está a vacío (contiene aire al interior) presenta en su superficie un flujo de calor que sale de su interior por conducción y que se transforma en un flujo de calor por convección y por radiación; entonces tiene como condición de frontera la ecuación 14.

$$-k_T \left[ \frac{\partial T}{\partial n} \right]_S = h(T_S - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_S^4 - T_{alred}^4) \quad (14)$$

Sin embargo, existe un calor perdido referente a la evaporación superficial, el cual resulta importante durante el proceso de secado cuando se tienen temperaturas mayores a 70°C (Pitchai, 2011); razón por la cual es necesario introducir otro término a la condición de frontera anterior que considere el calor por dicha evaporación en la superficie, obteniendo la ecuación 15.

$$-k_T \left[ \frac{\partial T}{\partial n} \right]_S = h(T_S - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_S^4 - T_{alred}^4) + e_s \frac{m_s}{A} \Delta H_{ev} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (15)$$

En la práctica, es común despreciar alguno de estos efectos bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, si el calentamiento es en vacío, el término de convección desaparece. Como se mencionó anteriormente, el término de radiación suele ser despreciable frente a los otros términos y el término de convección desaparece si no existe un elemento alguno que genere movimiento de fluido del medio donde está la muestra, con lo cual la ecuación 15 se reduce a la ecuación 16.

$$-k_T \left[ \frac{\partial T}{\partial n} \right]_S = e_s \frac{m_s}{A} \Delta H_{ev} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (16)$$

Otra condición de frontera es la condición de contorno isotérmica que considera que la temperatura de un cuerpo es constante a lo largo de su superficie, por lo que  $T_S$  es constante.

En el caso de que la muestra (material A) esté contenida en algún recipiente (material B), se presenta la condición de interfase en la superficie de contacto como lo representa la ecuación 17.

$$-k_{T_A} \left[ \frac{\partial T_A}{\partial n} \right]_S = -k_{T_B} \left[ \frac{\partial T_B}{\partial n} \right]_S \quad (17)$$

## 1.4.2. Mecanismos de transferencia de masa

### 1.4.2.1. Difusión

La difusión es un fenómeno de transporte de masa en el que una sustancia química A se transfiere o “fluye” en un medio B.

En el caso del secado, la sustancia química A es la humedad y el medio B, el sólido que está perdiendo dicha humedad; por lo que en las ecuaciones de transferencia de masa se sugiere como nomenclatura general  $X$  (humedad en base seca) en lugar de  $C_A$  y se puede hablar de tres tipos de difusión (aunque es posible que se presenten de manera combinada): (Mujumdar, 2006)

- *Difusión líquida*: si la temperatura del sólido es menor a la temperatura de ebullición del líquido (agua).
- *Difusión de vapor*: si el líquido se vaporiza dentro del material.
- *Por diferencia de presiones hidrostáticas*: cuando las ratios de evaporación interna exceden la ratio de transporte de vapor a través del sólido hacia los alrededores.

Las leyes físicas que describen el fenómeno de difusión son las leyes de Fick:

### 1.4.2.2. Primera ley de Fick

La primera ley de Fick está relacionada directamente con el flujo de la sustancia química A en el medio B.

$$\dot{N}_{dif} = -D_{AB} A \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (18)$$

La ecuación 18 establece que el flujo molar de la sustancia A por difusión en la dirección “x” es igual al producto del coeficiente de difusión (o difusividad de la masa) de A en la mezcla AB por la derivada parcial de la concentración de A en la dirección “x” y por el área perpendicular a esta dirección. Esta ecuación puede escribirse en términos de masa donde iría la primera derivada parcial de la densidad de A, en lugar de la de la concentración.

Esta ecuación es análoga a la ecuación de la ley de Fourier para la conducción de calor.

### 1.4.2.3. Segunda ley de Fick

La segunda ley de Fick es análoga a la ecuación de Fourier – Biot.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla C_A) \quad (19)$$

La ecuación 19 describe la difusión en un sistema tridimensional. Para un coeficiente de difusión efectivo constante y un sistema unidimensional, la ecuación 19 se escribe como la ecuación 20.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (20)$$

Si se considera A como la humedad presente en la muestra, el primer término de la ecuación es la velocidad de secado de la muestra; y al resolver la ecuación diferencial, se obtiene la función de la humedad para cualquier instante en una determinada posición.

Para sólidos no contraíbles, suponiendo que la difusión de la humedad tiene lugar solo en una dirección, es decir, en la dirección normal a la superficie de la placa y en dirección radial para el cilindro y la esfera, y que no existe otra forma de transporte de humedad que la difusión, se puede derivar la segunda ley de Fick a la ecuación 21. (Mujumdar, 2006)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^n D_{eff}(T_m, X) \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (21)$$

donde  $n = 0$  para placa, 1 para cilindro, 2 para esfera y  $r$  es la distancia actual (radio) medida desde el centro sólido. Este parámetro alcanza un valor máximo de  $R$ , es decir, la placa tiene un grosor de  $2R$  si se seca por ambos lados. (Mujumdar, 2006)

### 1.4.2.4. Condiciones de frontera

Se hace la suposición inicial indicando que el contenido de humedad está distribuido uniformemente y el contenido de humedad inicial del sólido es  $X_0$ . Para resolver la ecuación 21 se requiere un conjunto de condiciones de frontera.

Para números de Biot altos ( $Bi > 100$ ) se llama condición de frontera del primer tipo y asume la siguiente forma en la superficie sólida siguiendo la ecuación 22. (Mujumdar, 2006)

Para  $r = R$

$$X = X^*(t, Y) \quad (22)$$

Para números de Biot moderados ( $1 < Bi < 100$ ) se conoce como condición de frontera del tercer tipo y asume la forma de la ecuación 23. (Mujumdar, 2006)

Para  $r = R$

$$-D_{eff} \rho_m \left( \frac{\partial X}{\partial r} \right) = k_Y [Y^*(X, T)_i - Y] \quad (23)$$

Donde subíndice  $i$  denota la interfaz sólido-gas. La condición de frontera del segundo tipo, como se conoce del cálculo a partir de la ecuación 24. (flujo constante en la superficie). (Mujumdar, 2006)

Para  $r = R$

$$w_{Di} = \text{constante} \quad (24)$$

Esta tiene poco interés práctico y puede incorporarse en la condición de frontera del tercer tipo. Frecuentemente, la condición de frontera del tercer tipo se llama condición de frontera del segundo tipo. Además, en el plano de simetría se tiene la ecuación 25. (Mujumdar, 2006)

Para  $r = 0$

$$\frac{\partial X}{\partial r} = 0 \quad (25)$$

Al resolver la ecuación de Fick con difusividad constante, se recomienda convertirla a una forma adimensional. Las siguientes variables adimensionales que presentan para este propósito se encuentran en la ecuación 26. (Mujumdar, 2006)

$$\Phi = \frac{X - X^*}{X_c - X^*}, \quad Fo = \frac{D_{eff} \rho t}{R^2}, \quad \zeta = \frac{r}{R} \quad (26)$$

En la forma adimensional, la ecuación de Fick se convierte en la ecuación 27.

$$\frac{\partial X}{\partial Fo} = \frac{1}{\zeta^n} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \zeta^n \frac{D_{eff}}{D_{eff 0}} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right] \quad (27)$$

Por otro lado, las condiciones de frontera asumen la forma siguiente.

Condiciones de frontera 1 y 2 (ecuaciones 28 y 29, respectivamente)

$$\text{Para } \zeta = 1, \quad \Phi = 0 \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right)_i + Bi_D^* \Phi = 0 \quad (28)$$

$$\text{Para } \zeta = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 0 \quad \frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0 \quad (29)$$

$$Bi_D^* = m_{XY} \frac{k_Y \phi R}{D_{eff} \rho_m} \quad (30)$$

Donde la ecuación 30 es el número de Biot modificado en el que  $m_{XY}$  es una curva local de pendiente de equilibrio dada por la ecuación 31:

$$m_{XY} = \frac{Y^*(X, T_m)_i - Y}{X - X^*} \quad (31)$$

El número de Biot de difusión modificado por el factor  $m_{XY}$  debería utilizarse para la clasificación de los casos en lugar de  $Bi_D = k_Y R / (D_{eff} \rho_m)$  encontrado en varias literaturas. Debido a la dependencia de  $D_{eff}$  de  $X$ , el número de Biot puede variar durante el transcurso del secado, cambiando así la clasificación del problema. (Mujumdar, 2006)

Las soluciones de la ecuación derivada de la segunda ley de Fick han sido desarrolladas por Crank<sup>3</sup>, quien propone dichas soluciones a geometrías conocidas (placa plana, cilindro infinito y esfera) bajo ciertas condiciones de humedad. (Crank, 1975)

Para la placa plana de espesor  $L$ , se sigue la ecuación 32.

$$\frac{X}{X^*} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (32)$$

Para el cilindro infinito de radio  $R$ , se sigue la ecuación 33.

$$\frac{X}{X^*} = 1 - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left( -n^2 \pi^2 \frac{D_{eff}}{R^2} t \right) \quad (33)$$

Para la esfera de radio  $R$ , se sigue la ecuación 34.

<sup>3</sup> Ecuaciones tomadas del libro "The Mathematics of Diffusion" (1975) de John Crank.

$$\frac{X}{X^*} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff}}{R^2} t\right) \quad (34)$$

Cuando las condiciones no son isotérmicas, surge la pregunta de si es necesario resolver simultáneamente la ecuación Fourier-Biot y la ecuación de la segunda ley de Fick. Si los números de Biot para la transferencia de masa superan con creces los de la transferencia de calor, generalmente el problema de la transferencia de calor es puramente externo, y los perfiles internos de temperatura son casi planos. Esto permite usar un modelo de parámetros concentrados para el balance de energía. Por lo tanto, para controlar la temperatura del sólido es suficiente complementar la ecuación de Fourier-Biot con la ecuación 35. (Mujumdar, 2006)

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{A}{m_s c_s + c_{A1} \bar{X}} [q + ((c_A - c_{A1})T_m + \Delta h_{v0})w_D] \quad (35)$$

Si la ecuación Fourier-Biot y la ecuación de la segunda ley de Fick deben resolverse simultáneamente, el problema se vuelve más complicado y requiere un análisis más especializado. (Mujumdar, 2006)

### 1.4.3. Curvas de secado

El proceso de secado se puede representar gráficamente a través de curvas de secado, con las cuales se puede visualizar el proceso de secado tomando en cuenta determinadas variables, usualmente humedad y tiempo.

#### 1.4.3.1. Curva de velocidad de secado

Cada material posee una curva representativa que describe las características de secado de ese material en condiciones específicas de temperatura, velocidad y presión. Dicha curva se denomina curva de velocidad de secado y se obtiene al representar la velocidad de pérdida de masa (humedad) en función del tiempo, para una muestra del material expuesto al medio de secado en condiciones controladas y constantes. (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

La forma de la curva y los valores que representan la velocidad de secado dependen de la velocidad del medio de secado, la temperatura del medio de calentamiento, la distribución del tamaño de partículas, y las características de la estructura de las partículas, tales como el tamaño y la distribución del tamaño de poros (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017).

Durante la primera parte del secado la velocidad de secado es constante. En esta parte la difusión del agua a través del sólido es lo suficientemente rápida para mantener las condiciones saturadas en su superficie. (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

Durante la segunda parte, se da una disminución de la velocidad de secado. Esta parte se suele dividir en dos periodos: un periodo durante el cual la superficie del material está parcialmente húmeda y ningún mecanismo domina por completo; seguido por un periodo en el que la superficie del material está completamente seca y la difusión del agua a través del sólido es el mecanismo controlante de la velocidad de secado. Todo esto se aprecia en la figura 3 (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

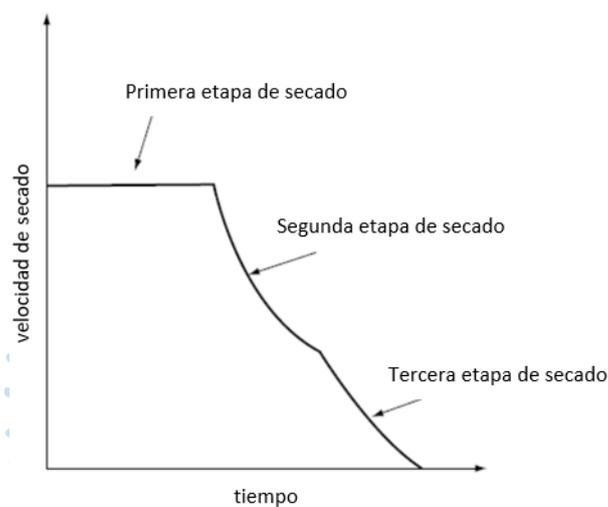


Figura 3 Curva de velocidad de secado típica, condiciones de secado constantes

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

Las velocidades de secado son muy difíciles de predecir para un determinado producto, sobre todo durante la parte de velocidad decreciente; y para determinarlas se requieren, por lo general, de métodos experimentales en condiciones controladas. (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

El contenido crítico de humedad se define como el contenido de humedad a la que finaliza la parte de velocidad constante y comienza la siguiente parte. Este valor depende de varios parámetros, tales como la estructura y el espesor del material, y el contenido inicial de humedad. (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

### 1.4.3.2. Curva “característica” de secado

Se llama curva característica o normalizada de secado a la curva que tiene como variables normalizadas a la velocidad de secado y el contenido característicos de humedad, que se definen en las ecuaciones 36 y 37, respectivamente, y se pueden observar en la figura 4. (Mujumdar, 2006)

$$f_{sc} = \frac{N_V}{N_W} \quad (36)$$

$$\phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_{cr} - X^*} \quad (37)$$

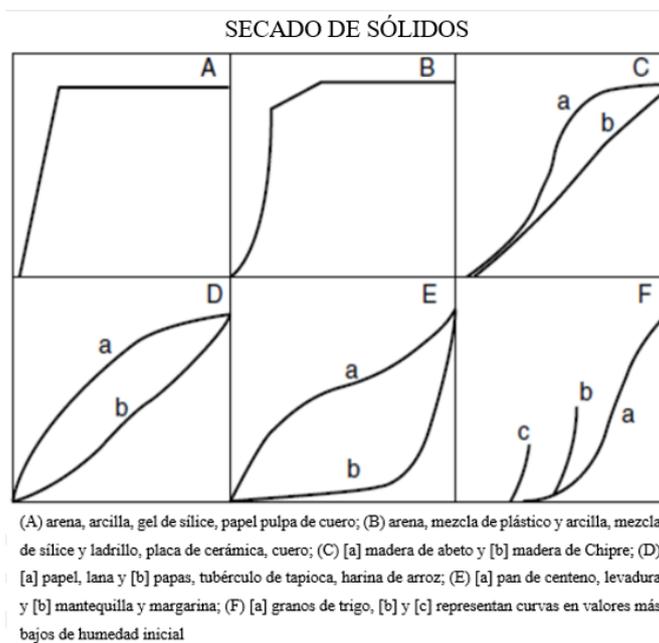


Figura 4 Ejemplos de curvas de secado normalizadas para diferentes tipos de medios

Fuente: Tomado de “Handbook of industrial drying”  
(Mujumdar, 2006)

Si el comportamiento del sólido se describe utilizando estas curvas, sus propiedades deben satisfacer las siguientes condiciones: (Mujumdar, 2006)

- El contenido crítico de humedad es invariante e independiente del contenido inicial de humedad y condiciones externas.
- Todas las curvas de secado para una sustancia específica son geoméricamente similares, así la forma de la curva es única e independiente de las condiciones externas.

Los criterios son restrictivos, y es difícil que los sólidos los satisfagan en un rango exhaustivo de condiciones; sin embargo, estas curvas son útiles como concepto para entender el proceso de secado. (Mujumdar, 2006)

### 1.4.3.3. Curva de la ecuación de Crank

Para una geometría de una lámina con espesor medio  $L$  y distribución uniforme de la humedad inicial, la solución de la ecuación diferencial de la segunda ley de Fick puede resultar en una ecuación modificada de la ecuación 32 presentada en la ecuación 38. (García, Sierra, & Miranda, 2016)

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (38)$$

La dificultad con la ecuación es el valor de  $D_{eff}$ . Este valor puede ser encontrado a través de distintos métodos (usualmente de manera experimental) como la ecuación modificada de Arrhenius mostrada en la ecuación 39. (García, Sierra, & Miranda, 2016)

$$D_{eff} = D_0 \exp \left( -\frac{E_a m}{P} \right) \quad (39)$$

Calculado  $D_{eff}$  se puede construir una gráfica utilizando el primer término de la serie infinita que tiene en las ordenadas el contenido de humedad  $X$  y en las abscisas el tiempo, como la que se observa en la figura 5.

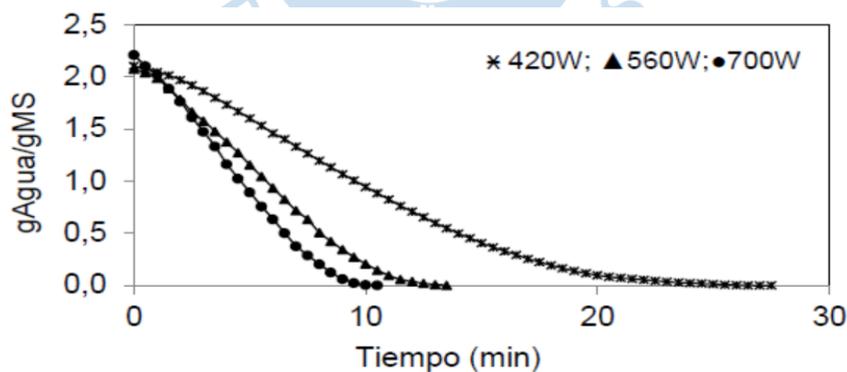


Figura 5 Rapidez de secado de una muestra de ñame de 50 gramos

Fuente: Tomado de " Modelado de la cinética de secado en microondas de ñame" (García, Sierra, & Miranda, 2016)

## 1.5. Parámetros de transporte

### 1.5.1. Humedad relativa y humedad absoluta

Se define la humedad relativa  $\varphi$  en la ecuación 40. (se utiliza  $\varphi$  definida como fracción decimal) (Mujumdar, 2006)

$$\varphi(t) = p/p_s(T) \quad (40)$$

La relación entre humedades absolutas y relativas se da en la ecuación 41.

$$Y = \frac{M_A}{M_B} \frac{\varphi p_s(T)}{P_0 - \varphi p_s(T)} \quad (41)$$

Se define la entalpía de gas húmedo en la ecuación 42. (unidad de masa de gas seco)

$$i_g = (c_A Y + c_B)T + \Delta h_{v0} Y \quad (42)$$

A una temperatura dada, las ecuaciones anteriores para una mezcla gas seco– vapor de agua quedarían plasmadas en las ecuaciones 43, 44 y 45 respectivamente.

$$Y = \frac{m_W}{m_G} = \frac{P_W}{P_G} \frac{M_W}{M_G} = \frac{P_W}{P_T - P_W} \frac{M_W}{M_G} \quad (43)$$

$$\psi = \frac{P_W}{P_W^0} \quad (44)$$

$$Y = \frac{M_W}{M_G} \frac{\psi P_W^0}{P_T - \psi P_W^0} \quad (45)$$

### 1.5.2. Presión de vapor saturado, calor latente de vaporización y específico

La dependencia de la presión de vapor saturado de la temperatura se define en la ecuación 46. (ecuación de Antoine): (Mujumdar, 2006)

$$\ln(p_s) = A - \frac{B}{C + T} \quad (46)$$

La dependencia del calor latente de la vaporización de la temperatura se define en la ecuación 47. (ecuación de Watson)

$$\Delta h_V = H(T - T_{ref})^n \quad (47)$$

La dependencia del calor específico de la temperatura para la fase de vapor se define en la ecuación 48. (forma polinómica)

$$c_A = c_{A0} + c_{A1}T + c_{A2}T^2 + c_{A3}T^3 \quad (48)$$

La dependencia del calor específico de la temperatura para la fase líquida se define en la ecuación 49. (polinómica)

$$c_{A1} = c_{A10} + c_{A11}T + c_{A12}T^2 + c_{A13}T^3 \quad (49)$$

En las Tablas 1 y 2 se encuentran los valores de las constantes de las ecuaciones de estas propiedades para algunos fluidos conocidos. En todas las ecuaciones  $T$  es la temperatura en K.

Tabla 1.

*Coefficientes aproximados para propiedades de líquidos seleccionados.*

| Propiedad                                    |                       | Agua      | Etanol    | Isopropanol | Tolueno   |
|--|-----------------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| Masa molar,<br>kg/kmol                       | $M_A$                 | 18.01     | 46.069    | 60.096      | 92.141    |
| Presión de vapor<br>saturado, kPa            | $A$                   | 16.376953 | 16.664044 | 18.428032   | 13.998714 |
|  | $B$                   | 3878.8223 | 3667.7049 | 4628.9558   | 3096.52   |
|  | $C$                   | 229.861   | 226.1864  | 252.636     | 219.48    |
| Calor de<br>vaporización,<br>kJ/kg           | $H$                   | 352.58    | 110.17    | 104.358     | 47.409    |
|  | $T_{ref}$             | 374.14    | 243.1     | 235.14      | 318.8     |
|  | $n$                   | 0.33052   | 0.4       | 0.371331    | 0.38      |
| Calor específico<br>de vapor,<br>kJ/(kg K)   | $c_{A0}$              | 1.883     | 0.02174   | 0.04636     | -0.4244   |
|  | $c_{A1} \times 10^3$  | -0.16737  | 5.662     | 5.95837     | 6.2933    |
|  | $c_{A2} \times 10^6$  | 0.84386   | -3.4616   | -3.54923    | -3.9623   |
|  | $c_{A3} \times 10^9$  | -0.26966  | 0.8613    | -16.3354    | 0.93604   |
| Calor específico<br>de líquido,<br>kJ/(kg K) | $c_{A10}$             | 2.822232  | -1.4661   | 5.58272     | -0.61169  |
|  | $c_{A11} \times 10^2$ | 1.182771  | 4.0052    | -4.6261     | 1.9192    |
|  | $c_{A12} \times 10^4$ | -0.350477 | -1.5863   | 1.701       | -0.56354  |
|  | $c_{A13} \times 10^6$ | 3.60107   | 22.873    | -16.3354    | 5.9661    |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

Tabla 2.

Coefficientes de ecuaciones aproximadas para propiedades de gases seleccionados.

| Propiedad                           |                      | Aire     | Nitrógeno | CO2      |
|-------------------------------------|----------------------|----------|-----------|----------|
| Masa molar, kg/kmol                 | $M_B$                | 28.9645  | 28.013    | 44.010   |
| Calor específico del gas, kJ/(kg K) | $c_{B0}$             | 1.02287  | 1.0566764 | 0.48898  |
|                                     | $c_{B1} \times 10^3$ | -0.5512  | -0.197286 | 1.46505  |
|                                     | $c_{B2} \times 10^6$ | 0.181871 | 0.49471   | -0.94562 |
|                                     | $c_{B3} \times 10^9$ | -0.05122 | -0.18832  | 0.23022  |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

### 1.5.3. Masa seca ( $m_S$ ) y velocidad de secado ( $w_D$ )

La tasa de secado volumétrica, que es necesaria en las ecuaciones de equilibrio, se define en las ecuaciones 50 y 51. (Mujumdar, 2006)

$$w_D a_V = -\frac{m_S}{A} a_V \frac{d\Phi}{dt} (X_C - X^*) \quad (50)$$

$$w_D a_V = -\frac{m_S}{V} \frac{d\Phi}{dt} (X_C - X^*) \quad (51)$$

Mientras que la masa seca se expresa según la ecuación 52.

$$m_S = V(1 - \varepsilon_v)\rho_S \quad (52)$$

Y la tasa de secado volumétrica también se expresa según la ecuación 53.

$$w_D a_V = -(1 - \varepsilon_v)\rho_S (X_C - X^*) \frac{d\Phi}{dt} \quad (53)$$

### 1.5.4. Conductividad térmica

Existe un modelo matemático para calcular la conductividad térmica en alimentos en función del contenido de humedad y temperatura definido por la ecuación 54. (Mujumdar, 2006)

$$k = \frac{1}{1+X} k_0 \exp\left(-\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right) + \frac{X}{1+X} k_i \exp\left(-\frac{E_i}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right) \quad (54)$$

Los parámetros ajustables se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros ajustables de la conductividad térmica.

|                 |  |
|-----------------|--|
| $k_0$ (W/(m K)) | Conductividad térmica para humedad $X = 0$ y temperatura $T = T_r$             |
| $k_i$ (W/(m K)) | Conductividad térmica para humedad $X = \infty$ y temperatura $T = T_r$        |
| $E_0$ (kJ/mol)  | Energía de activación para conducción de calor en material seco a $X = 0$      |
| $E_i$ (kJ/mol)  | Energía de activación para conducción de calor en material seco a $X = \infty$ |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

Para la papa, las estimaciones de parámetros del modelo matemático propuesto se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Parámetros del modelo matemático de la conductividad térmica.

| Material | N° docs | N° datos | $k_i$ (W/mK) | $k_0$ (W/mK) | $E_i$ (kJ/mol) | $E_0$ (kJ/mol) | <i>s. d.</i> (W/mK) |
|----------|---------|----------|--------------|--------------|----------------|----------------|---------------------|
| Papa     | 12      | 37       | 0.611        | 0.049        | 0.0            | 47.0           | 0.059               |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

### 1.5.5. Difusividad

La dependencia de la difusividad con la temperatura generalmente se puede describir mediante la ecuación 55 (ecuación de Arrhenius). (Mujumdar, 2006)

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a \cdot 10^{-6}}{RT}} \quad (55)$$

Para la estimación del coeficiente de difusión en medios macro porosos isotrópicos, la difusividad puede expresarse como la ecuación 56.

$$D = (\delta \varepsilon / \tau^2) D_A \quad (56)$$

A pesar de su simplicidad, la ecuación no permitirá la utilidad práctica a menos que se valide con modelos adicionales de espacio de poros, los parámetros  $(\varepsilon, t, \delta)$  determinados para una gran cantidad de sistemas y el efecto de la humedad del sólido previamente indicado. Para el caso de la papa se usa la ecuación 57 con sus respectivos valores. (Mujumdar, 2006)

$$D = D_0 \left( \exp\left(-\frac{X_0}{X}\right) \right) \left( \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \right) \quad (57)$$

$$D_0 = 2.41 \times 10^{-7} (m^2/s), X_0 = 7.62 \times 10^{-2} kg/kg db, T_0 = 1.49 \times 10^3.$$

Existe un modelo matemático de cálculo de la difusividad de humedad en los alimentos en función del contenido de humedad y la temperatura dado por la ecuación 58. (Mujumdar, 2006)

Los parámetros ajustables se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5.

*Parámetros ajustables de la difusividad.*

|                           |   |
|---------------------------|---|
| $D_0$ (m <sup>2</sup> /s) | Difusividad para humedad $X = 0$ y temperatura $T = T_r$            |
| $D_i$ (m <sup>2</sup> /s) | Difusividad para humedad $X = \infty$ y temperatura $T = T_r$       |
| $E_0$ (kJ/mol)            | Energía de activación para difusión en material seco a $X = 0$      |
| $E_i$ (kJ/mol)            | Energía de activación para difusión en material seco a $X = \infty$ |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

$$D = \frac{1}{1+X} D_0 \exp\left(-\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right) + \frac{X}{1+X} D_i \exp\left(-\frac{E_i}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right) \quad (58)$$

Para la papa, las estimaciones de parámetros del modelo matemático propuesto se presentan en la tabla 6.

Tabla 6.

*Parámetros del modelo matemático de la difusividad.*

| Material | N° docs | N° datos | $D_i$<br>(m <sup>2</sup> /s) | $D_0$<br>(m <sup>2</sup> /s) | $E_i$<br>(kJ/mol) | $E_0$<br>(kJ/mol) | <i>s. d.</i><br>(m <sup>2</sup> /s) |
|----------|---------|----------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Papa     | 16      | 106      | $1.57 \times 10^{-9}$        | $4.31 \times 10^{-10}$       | 44.7              | 76.9              | $4.02 \times 10^{-10}$              |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

## 1.6. Ecuaciones auxiliares

### 1.6.1. Ecuación de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

Esta ecuación mide la influencia de la humedad relativa en el contenido de humedad de equilibrio y se expresa según la ecuación 59. Sus parámetros están definidos en la ecuación 60. (Mujumdar, 2006)

$$X = \frac{b_0 b_1 b_2 a_w}{(1 - b_1 a_w)(1 - b_1 a_w + b_1 b_2 a_w)} \quad (59)$$

$$b_1 = b_{10} e^{b_1/RT}, \quad b_2 = b_{20} e^{b_{21}/RT} \quad (60)$$

Para el caso de la papa:

$$b_0 = 8.7, b_{10} \times 10^5 = 1.86, b_{11} = 34.1, b_{20} = 5.68, b_{21} = 6.75$$

### 1.6.2. Analogía calor-masa

Si la difusividad de masa es igual a la difusividad térmica, el número de Nusselt es igual al número de Sherwood. Si no es así, se utiliza la analogía de Chilton-Colburn definida en la ecuación 61. (Cengel & Ghajar, 2011)

General:

$$h_{masa} = \frac{h_{calor}}{\rho c_p} \left( \frac{D_{AB}}{\alpha} \right)^{2/3} = \frac{1}{2} f_r V_a \left( \frac{D_{AB}}{\nu} \right)^{2/3} \quad (61)$$

El caso especial ( $\nu = \alpha = D_{AB}$ ) se define en la ecuación 62.

$$h_{masa} = \frac{h_{calor}}{\rho c_p} = \frac{1}{2} f_r V_a \quad (62)$$

Se ha observado que la analogía de Chilton-Colburn es aplicable en el flujo laminar o turbulento sobre superficies planas. Pero este no siempre es el caso para el flujo interno y para el flujo sobre configuraciones geométricas irregulares. Al tratar con el flujo sobre cuerpos redondeados, el valor de “ $f_r$ ” de estas relaciones es el coeficiente de fricción superficial, no el coeficiente total de arrastre, el cual también incluye el arrastre por presión. Además, se presentan las ecuaciones de los números adimensionales adjuntados en el anexo 1. (Cengel & Ghajar, 2011)

### 1.7. Estado del arte

El secado de los productos alimenticios es una técnica que ha sido estudiada hace unos pocos años, a comparación de otras que también permiten sacar un mayor provecho de los nutrientes de estos.

Para esta presente investigación se ha procurado tomar en cuenta aquellos documentos con una investigación más reciente sobre el tema del secado. En el año 2012, Hosain Darvishi desarrolló una investigación denominada *Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices*, la cual se informaron las características de secado y los requisitos de energía para el secado por microondas de rodajas de papa a cuatro densidades de potencia de microondas, 5, 10, 15 y 20 W / g. Durante los experimentos, las rodajas de papa se secaron hasta el contenido de humedad final de 0.08 de 2.294 (kg H<sub>2</sub>O / kg de materia seca). Los datos experimentales se ajustaron a seis modelos de secado: Linear, Lewis, Henderson y

Pabis, Wang y Singh, Page y Midilli et al. modelos. Los modelos se compararon utilizando el coeficiente de determinación, el error cuadrático medio y el chi-cuadrado reducido.

El modelo "Midilli et al." describió mejor la curva de secado de las rodajas de papa. La difusividad efectiva de humedad se determinó utilizando la segunda ley de Fick y se observó que se encontraba entre  $0.025 \times 10^{-8}$  y  $3.05 \times 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{s}$  para las muestras de papa. Los requisitos mínimos y máximos de energía para el secado de rodajas de papa también se determinaron como  $4.22 \text{ MJ} / \text{kgH}_2\text{O}$  y  $10.56 \text{ MJ} / \text{kgH}_2\text{O}$  para 15 y 5 W / g, respectivamente. (Hosain)

Después de ello, en el año 2015, Plaza desarrolló el *Control De La Temperatura En Sistemas De Calentamiento Por Microondas*, en el cual sostiene que los sistemas de tratamiento térmico de materiales utilizando energía de microondas vienen utilizándose durante más de 60 años. La técnica en el diseño e implementación de este tipo de sistemas ha avanzado enormemente durante este tiempo, pero el control preciso de la temperatura de los materiales sigue presentando muchas dificultades teóricas y prácticas. Esta dificultad, en muchos casos, se presenta debido a que un correcto procesado por microondas de muchos materiales precisa de conocimientos en varias áreas técnicas, siendo la ingeniería de microondas sólo una de ellas. En muchas ocasiones es necesario combinar el conocimiento en esta área con conocimientos en tecnología de materiales, química, etc., para obtener una idea precisa de cómo ha de ser el proceso. El objetivo de este trabajo es desarrollar un equipo experimental que permita el tratamiento por microondas de muestras de materiales, manteniendo en todo momento un gran control sobre la temperatura y energía absorbida, lo que permite obtener unos datos muy valiosos sobre la dinámica de procesado de los materiales con esta tecnología. Con este objetivo, en un primer paso se han estudiado los diferentes tipos de aplicadores de microondas que se pueden utilizar, así como las técnicas de optimización de la distribución de temperatura aplicables a cada tipo de aplicador. Se han analizado las ventajas e inconvenientes que presentan los aplicadores multimodales. (Plaza, 2015)

Posteriormente, en el año 2017, Moreno, A.; Hernández, R.; Ballesteros, I. desarrollaron el *Secado industrial con energía microondas* en donde proporciona un análisis de los fundamentos de los procesos de calentamiento y secado utilizando energía de microondas, se discuten sus ventajas y desventajas; y muestra algunas de las diferentes aplicaciones industriales de estos procesos. Dada la importancia de la producción agrícola en Ecuador, se hace hincapié en las investigaciones realizadas sobre la aplicación de esta tecnología en el

secado de semillas y productos hortícolas. Basado en el análisis del conocimiento generado en este campo se evidencia que el uso de la tecnología de microondas tiene un gran potencial para contribuir a mejorar la conservación de las semillas, la calidad de los productos vegetales deshidratados y mejorar la eficiencia energética del proceso de secado. (Moreno, Hernández, & Ballesteros, 2017)

En el año 2018, Ali Nasr a través de su investigación *Microwave Drying* afirma que la deshidratación ofrece un medio para preservar los alimentos en una condición estable y segura, ya que reduce la actividad del agua y prolonga la vida útil mucho más que la de las frutas y verduras frescas. Muchos métodos térmicos convencionales, incluidos el secado por flujo de aire, el secado al vacío y la liofilización, dan como resultado tasas de secado bajas en el período de secado de la tasa de caída (Clary et al., 2005; Zhang et al., 2005). Los largos tiempos de secado a temperaturas relativamente altas durante los períodos de caída a menudo conducen a una degradación térmica indeseable de los productos terminados (Mousa y Farid, 2002). Se utilizan diferentes métodos de secado en el secado de frutas y verduras. El secado por aire caliente es el método más común en el secado de alimentos. Sin embargo, este método conduce a lesiones graves, como el empeoramiento del sabor, el color y el contenido nutricional del producto seco; disminución de la densidad y la capacidad de absorción de agua; así como el desplazamiento de los solutos de la parte interna del material de secado a la superficie, debido al largo período de secado y la alta temperatura (Alibas, 2007). Otros efectos adversos incluyen la capacidad de rehidratación del agua y el movimiento del material de secado. El método más común utilizado en el secado de alimentos es el secado por convección. Sin embargo, este método tiene una serie de desventajas, como un período de secado muy largo y un alto consumo de energía (Dadali et al., 2007). El secado al vacío es una técnica empleada para el secado de varios productos alimenticios para una mejor retención de su color y contenido de vitaminas (Methakhup et al., 2005). El vacío mejora la transferencia de masa debido a un mayor gradiente de presión entre el interior y el exterior de la muestra. También mantiene un nivel de baja temperatura esencial para los productos termolábiles (Pere y Rodier, 2002). Se puede retener una mejor calidad del producto con respecto a rasgos como el sabor, el color y la rehidratación mediante un tratamiento de alto vacío. (Nasr, 2018)

Finalmente, en el año 2019, Romero, R presentó una investigación sobre productos locales denominada *Deshidratación De La Papa (Solanum Tuberosum) De Descarte Del Mercado Mayorista De Piura Para La Obtención De Papa Seca Para Uso Alimenticio*. En él evaluó la elaboración de la papa deshidratada a partir de papa fresca y su periodo de

conservación, siendo el contenido de humedad un factor determinante, obteniéndose una humedad de la papa deshidratada de 12.20%, a 75 °C, mostrándose inocuo en stand al tener menos de 10 ufc/g de hongos apto para el consumidor, para el objetivo específico de la investigación de la predicción de anaquel o vida útil de la papa deshidratada, se desarrolló dentro de la metodología experimental, realizando una aplicación de la curva de GAB y la ecuación matemática de Heiss y Eichner y predecir el periodo de duración en stand, obteniéndose una predicción de 19 días, siendo un factor de deterioro la humedad. Por otro lado, se obtuvo los datos de humedad en función a los datos obtenidos por la ecuación de GAB a 25°C, 35 °C y 45 °C, y un contenido de humedad relativa del 70% en la ciudad de Piura. (Romero, 2019)

La deshidratación ofrece un medio para preservar los alimentos en una condición estable y segura, ya que reduce la actividad del agua y prolonga la vida útil mucho más que la de las frutas y verduras frescas. Muchos métodos térmicos convencionales, incluidos el secado por flujo de aire, el secado al vacío y la liofilización, dan como resultado tasas de secado bajas en el período de secado de la tasa de caída (Clary et al., 2005; Zhang et al., 2005). Los largos tiempos de secado a temperaturas relativamente altas durante los períodos de caída a menudo conducen a una degradación térmica indeseable de los productos terminados (Mousa y Farid, 2002). Se utilizan diferentes métodos de secado en el secado de frutas y verduras. El secado por aire caliente es el método más común en el secado de alimentos. Sin embargo, este método conduce a lesiones graves, como el empeoramiento del sabor, el color y el contenido nutricional del producto seco; disminución de la densidad y la capacidad de absorción de agua; así como el desplazamiento de los solutos de la parte interna del material de secado a la superficie, debido al largo período de secado y la alta temperatura (Alibas, 2007). Otros efectos adversos incluyen la capacidad de rehidratación del agua y el movimiento del material de secado. El método más común utilizado en el secado de alimentos es el secado por convección. Sin embargo, este método tiene una serie de desventajas, como un período de secado muy largo y un alto consumo de energía (Dadali et al., 2007). El secado al vacío es una técnica empleada para el secado de varios productos alimenticios para una mejor retención de su color y contenido de vitaminas (Methakrup et al., 2005). El vacío mejora la transferencia de masa debido a un mayor gradiente de presión entre el interior y el exterior de la muestra. También mantiene un nivel de baja temperatura esencial para los productos termolábiles (Pere y Rodier, 2002). Se puede retener una mejor calidad del producto con respecto a rasgos como el sabor, el sabor y la rehidratación mediante un tratamiento de alto vacío. (Nasr, 2018)



## Capítulo 2

### Análisis del sistema

#### 2.1. Descripción analítica

Se cuenta con un horno microondas casero para el proceso de secado que tendrá como muestra una rebanada de papa definida a través de una geometría conocida. Es de interés la papa peruana porque es un tubérculo básico de la dieta de la población, fuente de ingresos económicos para las familias campesinas de la sierra y de gran variedad, como se muestra en la figura 6. (Pumisacho, 2002)



Figura 6 Variedades de papa amarga

Fuente: Variedades nativas y mejoradas de papa en Puno

El sistema comprende una transferencia de calor que se produce emitiendo ondas a través del dispositivo microondas, las cuales excitan a las moléculas de la papa y generan una vibración.

Algunas características de la muestra y del medio son las siguientes. (Correa & Hernández, 2011)

- La superficie de la muestra solo está disponible para la radiación de microondas y se asume una intensidad uniforme, y el campo eléctrico incidente es normal a la superficie del material.
- La muestra es homogénea e isotrópica, con propiedades dieléctricas constantes, la conductividad térmica y la difusividad se consideran dependientes de la temperatura, mientras que el calor específico y la densidad se consideran dependientes tanto de la temperatura como de la humedad. Aunque para algunos casos, o para mayor simplicidad, se pueden considerar constantes algunos de estos valores.
- No se toman en cuenta cambios en volumen (reducción o deformación).
- El volumen comprendido de la muestra elevará su temperatura, y la humedad contenida dentro de la muestra de papa pasa de su estado líquido a su estado gaseoso, generándose vapor de agua que envuelve a la superficie de la papa.
- Los equipos de microondas requieren un sistema de ventilación e incluso, para evitar reducción en la velocidad de secado, se requiere la incorporación de equipos de vacío que reduzcan la presión generada por el vapor de agua que sale del material que está siendo secado.
- El aire de secado es incompresible y con propiedades dependientes de la temperatura; y la convección en la superficie se considerará solo si existe un ventilador o algún dispositivo generador de movimiento de fluido.
- La disipación viscosa se considera despreciable.
- La dirección de la transferencia de calor se considerará de manera unidireccional, lo que significa que el flujo de calor se dará en una sola dirección (normal hacia la superficie).
- La geometría de la muestra es de suma importancia, puesto que la transferencia de calor y masa que ocurre en su interior es dependiente de ella. Esta, por ejemplo, determinará la aparición de *hot spots* o puntos de calentamiento en el producto final, afectando la uniformidad de las propiedades.

Todas las hipótesis dadas anteriormente servirán para obtener un análisis más exacto con resultados aproximados a la realidad.

Una manera de representar el sistema a implementar se encuentra en la figura 7.

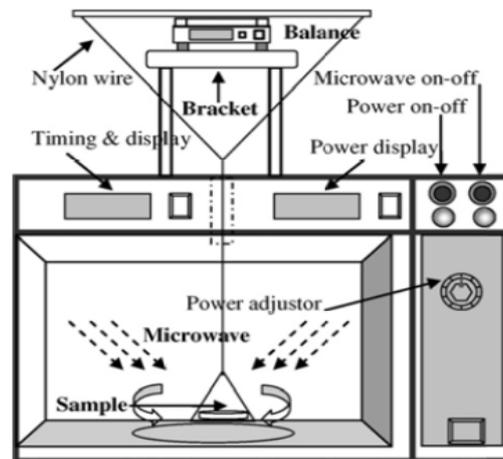


Figura 7 Diagrama esquemático de un secador microondas

Fuente: Tomado de "Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices" (Hosain)

Obtener un producto deshidratado por microondas requiere la generación de un campo electromagnético y las condiciones óptimas para que se dé la interacción de este con el producto a deshidratar. En este trabajo se plantea un prototipo basándose en un horno microondas casero Samsung Modelo N°. MG1045SD.

Un horno microondas consiste principalmente de un generador de microondas (magnetrón), tubos de aluminio llamados guías de onda, y una cavidad metálica (cavidad de resonancia). (Gunasekaran, 2002)

El generador de microondas es un diodo cilíndrico, que está compuesto por un tubo de cobre sellado. El tubo contiene platos de cobre que señalan hacia el centro como rayos en una rueda. Este ensamblado es llamado ánodo y tiene un filamento de cable en forma de espiral (cátodo) en el centro. Cuando un alto voltaje es aplicado (4000 V), el cátodo produce electrones libres, que dejan su energía para producir microondas que oscilan rápidamente, las que son dirigidas hacia una guía de ondas. La guía refleja el campo eléctrico internamente y así lo transfiere a la cavidad de resonancia. (Fellows, 2000)

Dentro de la cavidad de resonancia el campo electromagnético no es uniforme; es el plato giratorio del horno el encargado de disminuir esa desconformidad, para así evitar zonas con mayor interacción, para no disminuir la calidad final del producto deshidratado.

Según el fabricante el horno presenta las especificaciones presentadas en la figura 8.

### Especificaciones

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Modelo                    | MG1045   |
| Cavidad del horno         | 28 litros                                      |
| Controles                 | 10 Niveles de potencia incluyendo descongelado |
| Cronómetro                | 99 minutos 99 segundos                         |
| Fuente de energía         | 220 V ca 60 Hz                                 |
| Salida de potencia        | Microondas 950 Watts<br>Dorador 1200 Watts     |
| Dimensiones exteriores    | 56,6 (Ancho) x 35,8 (Alto) x 46,6 (Fondo) cm   |
| Dimensiones cavidad horno | 33,6 (Ancho) x 23,1 (Alto) x 34,8 (Fondo) cm   |
| Peso Neto/Bruto           | 14,8/17,8 kg                                   |

Figura 8 Especificaciones horno Samsung MG1045

Fuente: Tomado de “Manual de Usuario Horno Microondas MG1045”

(Samsung Electronics Co., Ltd., 2004)

Este horno tiene una salida de frecuencia de 2450 MHz y una potencia de entrada de 1500 W. (Samsung Electronics Co., Ltd., 2004)

Debido a que se trata de un horno microondas con una muestra de papa que no tiene una cantidad considerable de agua en su interior, no se generaría una saturación de humedad en el medio y por ende no sería necesario el uso de un elemento que retire el vapor generado en el proceso (un ventilador, por ejemplo).

## 2.2. Análisis matemático

### 2.2.1. Planteamiento del modelo

El modelo matemático que se emplea para el análisis del secado microondas es el que se planteó en el capítulo 1 para la transferencia de calor y la transferencia de masa, que consiste en las ecuaciones 11 y 19, respectivamente.

Estas ecuaciones tienen un alto grado de complejidad, y, como se mencionó anteriormente, resolverlas simultáneamente resulta en un cálculo analítico complejo y especializado. Por lo cual, el modelo debe simplificarse bajo ciertas consideraciones de análisis.

### 2.2.2. Consideraciones de análisis

La principal consideración de análisis es desarrollar el modelo en una sola dirección, es decir, que el modelo se simplifica a uno de carácter unidimensional. Con lo cual las ecuaciones se reducen para el calor y la humedad a las ecuaciones 63 y 21, respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(X) |\vec{E}_{rms}(X)|^2}{\rho c_p} + \frac{e_v}{c_p} \Delta H_{ev} \frac{dX}{dt} \quad (63)$$

Sin embargo, aún resulta complicado resolver ambas ecuaciones diferenciales simultáneamente, por lo que se plantea la alternativa de resolverlas por separado. Para ello es necesario verificar una condición que valide este procedimiento la cual, como se mencionó anteriormente, es que la transferencia de masa controle el proceso y sea dominante respecto a la transferencia de calor, y para que esto sea verdadero se debe cumplir la desigualdad de la ecuación 64 y que se desarrolla en la ecuación 65, 66 y 67. Cabe mencionar que la analogía de dichos procesos termodinámicos se menciona en el anexo 2.

$$Bi_{masa} \gg Bi_{calor} \quad (64)$$

$$\frac{h_{masa} L}{D_{AB}} \gg \frac{h_{conv} L}{k} \quad (65)$$

$$\frac{\frac{h_{masa} L}{D_{AB}}}{\frac{h_{conv} L}{k}} \gg 1 \quad (66)$$

$$\frac{h_{masa} k}{D_{AB} h_{conv}} \gg 1 \quad (67)$$

Utilizando la analogía de Chilton-Colburn presentada en la ecuación 68, se desarrolla desde las ecuaciones 69 a la 71 concluyendo con la ecuación 72.

$$\frac{h_{calor} \left(\frac{D_{AB}}{\alpha}\right)^{2/3} k}{\rho c_p D_{AB} h_{calor}} \gg 1 \quad (68)$$

$$\frac{\left(\frac{D_{AB}}{\alpha}\right)^{2/3} k}{\rho c_p D_{AB}} \gg 1 \quad (69)$$

$$\frac{\left(\frac{D_{AB}}{\alpha}\right)^{2/3} \alpha}{D_{AB}} \gg 1 \quad (70)$$

$$\left(\frac{D_{AB}}{\alpha}\right)^{-1/3} \gg 1 \quad (71)$$

$$\alpha \gg D_{AB} \quad (72)$$

Esta condición puede verificarse desde el punto de vista de análisis de los sistemas concentrados, donde se puede realizar dicho análisis siempre y cuando el número de Biot sea bastante pequeño y dicha condición corresponde a una conductividad térmica alta, y por tanto a una difusividad térmica alta. Haciendo la analogía a la desigualdad presentada, será menor el número de Biot cuya difusividad sea más alta, con lo cual el proceso dominante del sistema será el que tenga la menor difusividad.

Para realizar este análisis se usan las ecuaciones 54 y 58 para la conductividad térmica y la difusividad de masa, respectivamente, las cuales tienen una similitud notable para darle mayor validez a la comparación:

Los valores de las constantes para la papa se encuentran en la tabla 4 para la conductividad térmica y en la tabla 6 para la difusividad de masa.

Para comprobar la desigualdad, se proponen algunos valores de temperatura y humedad los cuales se desarrollan en el anexo 3, 4 y 5.

A la temperatura ambiente (25°C) constante y distintos valores de humedad se tienen los resultados de la figura 9.

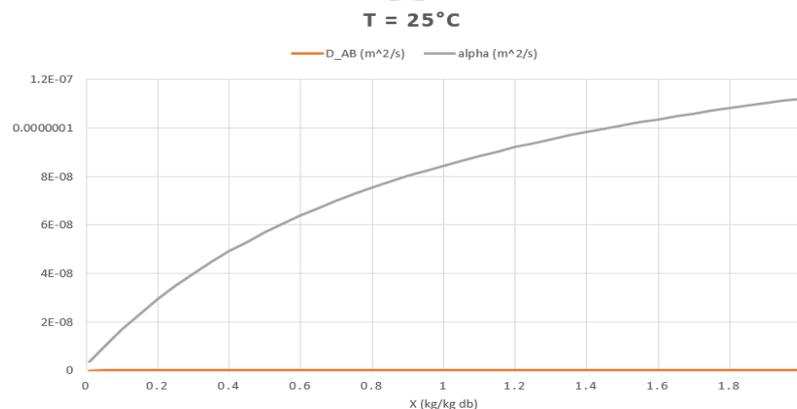


Figura 9 Difusividades a temperatura ambiente y humedad variable

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la difusividad de masa es menor a la difusividad térmica y solo son comparables a humedades bajas para esta temperatura. A una temperatura menor ( $10^{\circ}\text{C}$ ) se presentan los resultados de la Figura 10.

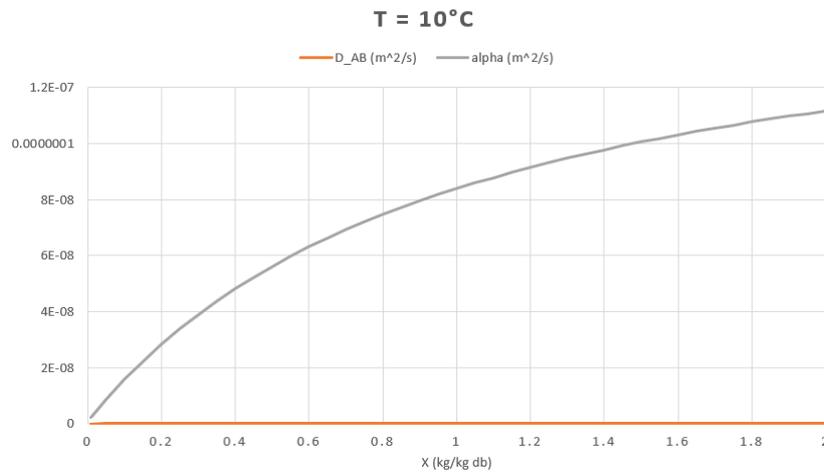


Figura 10 Difusividades a temperatura  $10^{\circ}\text{C}$  y humedad variable

Fuente: Elaboración propia

Se observa que, con los mismos valores de humedad a una temperatura más baja, los valores de las difusividades se hacen más cercanos. Entonces, para temperaturas muy bajas y valores de humedad muy bajos en una papa el efecto de la conducción de calor es comparable al efecto de la difusión de masa.

Con una temperatura de  $125^{\circ}\text{C}$  y los mismos valores de humedad, se obtienen los resultados de la figura 11.

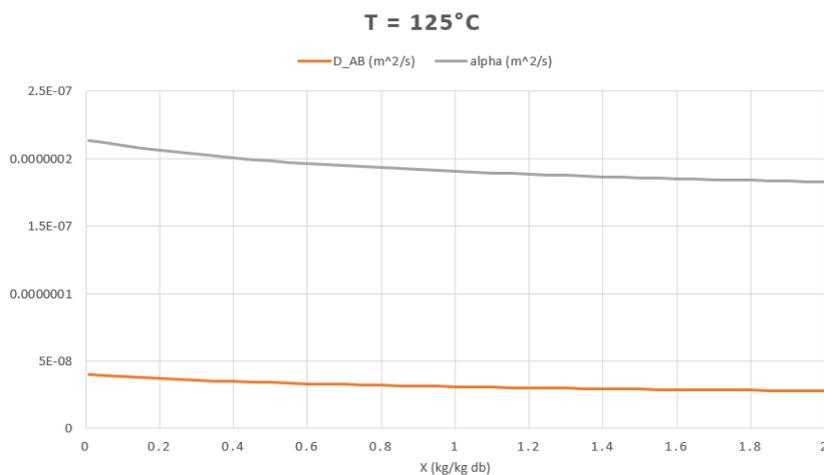


Figura 11 Difusividades a temperatura  $125^{\circ}\text{C}$  y humedad variable

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que, a temperaturas elevadas, el efecto de la conducción de calor es comparable al de la difusión de masa y el contenido de humedad no es muy influyente en este caso; con lo cual se puede afirmar que, a temperaturas muy altas, la conducción de calor es el efecto predominante en el proceso.

Recapitulando, a temperaturas cercanas a la referencia tomada de 60°C para las ecuaciones utilizadas para la papa, el fenómeno de difusión de masa es el que predomina en el proceso; a temperaturas mucho menores a la referencia, solo si la humedad es baja, la conducción de calor es comparable a la difusión de masa; y a temperaturas mucho mayores a la referencia, sin importar la humedad, la conducción de calor es el fenómeno dominante del proceso, en especial a humedades bajas.

Con esta afirmación, resulta factible utilizar la ecuación 35, en la cual el proceso de transferencia de calor se controla externamente y es dependiente solo del tiempo.

Para el proceso de secado de la papa en cuanto a la temperatura, sobre todo en la parte inicial de este, es probable que, en la parte final, si se alcanzan temperaturas elevadas, ya no resulte conveniente utilizar esta expresión. Por lo tanto, el problema se resume a resolver las ecuaciones de difusión de masa.

### **2.2.3. Parámetros**

#### **2.2.3.1. Temperatura**

Este parámetro es el de mayor importancia dentro del estudio porque de la temperatura dependen gran cantidad de los demás parámetros, y de ella depende el fenómeno de transferencia de calor.

Para poder determinar la cantidad de vapor de agua que sale de la muestra se ha planteado que el valor inicial de la temperatura será de 27°C debido a que corresponde a la temperatura ambiente. Esta temperatura se eleva debido al calentamiento producido por las ondas microondas. Dentro de este intervalo de temperatura se estudiará el comportamiento de la muestra correspondiente a las distintas variables de análisis. (Electrodomésticos)

#### **2.2.3.2. Constante dieléctrica**

Como se definió en la sección 1.2., la constante dieléctrica es dependiente del material, y se han establecido valores de dicho valor para la papa, los cuales se presentan en la tabla 7.

Tabla 7.

*Propiedades dieléctricas de la papa (modificada).*

| Muestra | % humedad | Constante dieléctrica |           | Factor de pérdida dieléctrica |           |
|---------|-----------|-----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
|         |           | 915 MHz               | 2 450 MHz | 915 MHz                       | 2 450 MHz |
| Papa    | 79        | 62                    | 57        | 22                            | 17        |

Fuente: Tomado de “Microwave drying of fruits and vegetables” (Orsat, Changrue, & Raghavan, 2006)

### 2.2.3.3. Humedad de la muestra

La cantidad de humedad en la muestra puede ser expresada en volumen y/o masa, en el caso de la deshidratación el volumen no es constante por tanto se dará en una relación de masa y puede ser dada respecto a la masa del producto seco o del producto húmedo. Todos los parámetros mencionados se reflejan en las ecuaciones 73, 74 y 75. (Menéndez & Moreno, 2017)

$$X = \left[ \frac{\text{masa humedad}}{\text{masa material seco}} \right] \quad (73)$$

$$W = \left[ \frac{\text{masa húmeda}}{\text{masa material húmedo}} \right] \quad (74)$$

$$W = \left[ \frac{\text{masa húmeda}}{\text{masa material seco} + \text{masa humedad}} \right] \quad (75)$$

Ambos valores se relacionan a través de la ecuación 76.

$$X = \left[ \frac{W}{1 - W} \right] \quad (76)$$

La cantidad de agua (humedad) en la muestra es proporcional a la cantidad de energía absorbida por microondas: mientras más húmedo sea el producto mayor será el factor de pérdidas dieléctricas, por ende, el producto será más receptivo al calentamiento por microondas.

Es el principal parámetro pues el valor de los parámetros controlables estará regido por el valor de este parámetro y la manera óptima de cómo reducirlo.

### 2.2.3.4. Masa y geometría

La masa y la geometría de la muestra influirá en la manera en cómo interactúan las microondas con el producto, se puede colocar una masa individual o un conjunto de muestras.

La forma de la muestra será la base para la simulación, pues dependiendo de esta se puede aproximar a un sistema unidimensional o bidimensional para simplificar los cálculos. En este

caso se toma una geometría regular de un cilindro de una altura pequeña, dando forma como si fuera una rebanada.

### 2.2.3.5. Potencia del microondas

El calentamiento por microondas implica la conversión de energía electromagnética en calor. El calor transferido a cada unidad de volumen del material colocado en el camino de las microondas está dado por Decareau y Peterson en la ecuación 77. (Metaxas & Meredith, 1983)

$$P = 55.61 \times 10^{-14} f E^2 \epsilon'' \quad (77)$$

La potencia requerida para elevar la temperatura de un material, sujeto a energía microondas, desde  $T_0$  a  $T$  ( $^{\circ}$  C) en  $t$  segundos está dado por la ecuación 78. (Metaxas & Meredith, 1983)

$$P = \frac{\rho C_p (T - T_0)}{t} \quad (78)$$

La intensidad del campo electromagnético es proporcional a la potencia generada por el magnetrón, es decir si se aumenta la potencia del microondas, aumenta la potencia absorbida por el producto a deshidratar, y modificando este parámetro se puede controlar los siguientes parámetros: velocidad de secado y temperatura final.

Se puede observar en la fórmula que a mayor potencia absorbida se necesitará menos tiempo, y que para lograr mayores temperaturas se debe generar mayor potencia.

### 2.2.3.6. Frecuencia de las microondas

Existen dos opciones posibles de frecuencia para las microondas: 945 y 2 450 MHz. Al modificar este parámetro lo que se logra es aumentar o disminuir la penetración de las microondas en la muestra, las microondas con menor frecuencia presentan una longitud de onda mayor y son estas frecuencias con las que se obtiene mayor penetración, pues en la ecuación 5 (presentada en la sección 1.2.) se tiene a la frecuencia como denominador. Si se realiza la parte experimental en un microondas casero, su frecuencia de trabajo es 2 450 MHz.

### 2.2.3.7. Tiempo de deshidratación

Para las primeras pruebas se analizará el comportamiento de la temperatura que incide en la muestra de papa en los primeros 220 segundos. Este tiempo se ha determinado a partir del método experimental utilizando Ansys® WorkBench.

#### 2.2.4. Cálculos analíticos

Sabiendo que la transferencia de calor se redujo a la ecuación 35, los cálculos están orientados a encontrar los valores de las constantes y plantear las ecuaciones que definan el modelo que se desea analizar.

Dado que el proceso dominante es el de la difusión de masa se empieza analizando este. Como se presentó en la sección 1.4.2, las soluciones para la ecuación diferencial de la difusión de masa unidimensional resuelta individualmente son las ecuaciones 32, 33 y 34.

Dado que la muestra para la evaluación es un cilindro corto de diámetro 6 cm y altura 1 cm, la ecuación que gobierna la transferencia de masa es la solución multidimensional para un cilindro corto (resulta de la intersección de un cilindro infinito con una placa plana) que se define en la ecuación 79.

$$\left(\frac{X}{X^*}\right)_{cilindro\ corto} = \left(\frac{X}{X^*}\right)_{cilindro\ infinito} * \left(\frac{X}{X^*}\right)_{placa\ plana} \quad (79)$$

Dado que las ecuaciones de humedad son series infinitas, se puede aproximar dicho resultado al primer término de la sumatoria según la ecuación 80, por lo cual  $n = 1$ .

$$\left(\frac{X}{X^*}\right)_{cilindro\ corto} = \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{9\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]\right) * \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff}}{R^2} t\right)\right) \quad (80)$$

Asumiendo un valor promedio de  $D_{eff} = 2.6 * 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s (un valor aceptable que se encuentra en la literatura (Mujumdar, 2006), y necesario para la solución numérica) se obtiene la ecuación 81.

$$\begin{aligned} \left(\frac{X}{X^*}\right)_{cilindro\ corto} &= 1 - \frac{4}{\pi^2} e^{-2.7416 * 10^{-6} t} - \frac{8}{\pi^2} e^{-5.7737 * 10^{-5} t} \\ &\quad + \frac{32}{\pi^4} e^{-6.04786 * 10^{-5} t} \end{aligned} \quad (81)$$

Esta es la ecuación propuesta para el contenido de humedad en función del tiempo. Ahora es necesario encontrar la expresión para la temperatura a partir de la ecuación 35. La expresión final tendrá en cuenta la presentación y desarrollo de las ecuaciones 82 a la 97.

$$A = \pi \times \frac{(0.06)^2}{4} = 2.8274 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (82)$$

$$m_s = 0.01618 \text{ kg} \quad (83)$$

$$c_s = 3.515 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (84)$$

$$c_{A1} = c_{A10} + c_{A11}T + c_{A12}T^2 + c_{A13}T^3 \quad (85)$$

$$c_{A1} = 2.822232 + 1.182771 \times 10^{-2}T - 0.350477 \times 10^{-4}T^2 + 3.60107 \times 10^{-6}T^3 \quad (86)$$

$$\bar{X} = \frac{X_0 + X^*}{2} = \frac{0.79 + 0.15}{2} = 0.47 \quad (87)$$

$$q = q_{gen}h \quad (88)$$

$$q = 1362.937406 \text{ W/m}^2 \quad (89)$$

$$c_A = c_{A0} + c_{A1}T + c_{A2}T^2 + c_{A3}T^3 \quad (90)$$

$$c_A = 1.883 - 0.16737 \times 10^{-3}T + 0.84386 \times 10^{-6}T^2 - 0.26966 \times 10^{-9}T^3 \quad (91)$$

$$\Delta h_{v0} = 352.58[(T - 374.14)^{0.33052}] \quad (92)$$

$$w_D = -\frac{m_s}{A} \frac{d\phi}{dt} (X_C - X^*) \quad (93)$$

$$w_D = -\frac{0.01618}{2.8274 \times 10^{-3}} \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{X - X^*}{X_C - X^*} \right) (X_C - X^*) \right) \quad (94)$$

$$w_D = -\frac{0.01618}{2.8274 \times 10^{-3}} \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{X - X^*}{X_C - X^*} \right) (X_C - X^*) \right] \quad (95)$$

$$w_D = -\frac{0.01618}{2.8274 \times 10^{-3}} \left( \frac{d}{dt} (X - X^*) \right) \quad (96)$$

$$w_D = -\frac{0.01618}{2.8274 \times 10^{-3}} \frac{dX}{dt} \quad (97)$$

Se requiere la derivada de la humedad respecto al tiempo, la cual se obtiene desarrollando las ecuaciones 98 y 99.

$$\left(\frac{X}{X^*}\right)'_{cc} = (1.111 \times 10^{-6})e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} + (4.68 \times 10^{-5}) \times e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} - (1.9868 \times 10^{-5})e^{-6.04786 \times 10^{-5}t} \quad (98)$$

$$\frac{dX}{dt} = X^*[(1.111 \times 10^{-6})e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} + (4.68 \times 10^{-5}) \times e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} - (1.9868 \times 10^{-5})e^{-6.04786 \times 10^{-5}t}] \quad (99)$$

Tomando  $X^* = 0.15$  se tiene la ecuación 100.

$$\frac{dX}{dt} = (1.66 \times 10^{-7})e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} + (7.02 \times 10^{-6}) \times e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} - (2.9802 \times 10^{-6})e^{-6.04786 \times 10^{-5}t} \quad (100)$$

Por tanto,  $w_D$  queda expresado en las ecuaciones 101 y 102.

$$w_D = -\frac{0.01618}{2.8274 \times 10^{-3}} [(1.66 \times 10^{-7})e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} + (7.02 \times 10^{-6})e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} - (2.9802 \times 10^{-6}) \times e^{-6.04786 \times 10^{-5}t}] \quad (101)$$

$$w_D = -9.5 \times 10^{-7}e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} - 4.02 \times 10^{-5}e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} + 1.71 \times 10^{-5}e^{-6.04786 \times 10^{-5}t} \quad (102)$$

Reemplazando en la ecuación principal, queda expresada en la ecuación 103 y se desarrolla en la ecuación 104 y 105.

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{A}{m_s c_s + c_{A1} \bar{X}} [q + ((c_A - c_{A1})T_m + \Delta h_{v0})w_D] \quad (103)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{2.8274 \times 10^{-3}}{0.01618} \times \frac{1}{3.515 + 0.47[2.822232 + 1.182771 \times 10^{-2}T - 0.350477 \times 10^{-4}T^2 + 3.60107 \times 10^{-6}T^3]} \times [1362.94 + ((1.883 - 0.16737 \times 10^{-3}T + 0.84386 \times 10^{-6}T^2 - 0.26966 \times 10^{-9}T^3 - (2.822232 + 1.182771 \times 10^{-2}T - 0.350477 \times 10^{-4}T^2 + 3.60107 \times 10^{-6}T^3))T_m + 352.58 \times (T - 374.14)^{0.33052}) \times (-9.5 \times 10^{-7}e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} - 4.02 \times 10^{-5}e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} + 1.71 \times 10^{-5}e^{-6.04786 \times 10^{-5}t})] \quad (104)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{0.175(1362.94)}{3.515 + 1.33 + 5.56 \times 10^{-3}T - 1.65 \times 10^{-5}T^2 + 1.69 \times 10^{-6}T^3 + \{[(-0.939 - 0.012T + 3.59 * 10^{-5}T^2 - 3.60 \times 10^{-6}T^3)T_m + 352.58 \times (T - 374.14)^{0.33052}][(-9.5 \times 10^{-7}e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} - 4.02 \times 10^{-5}e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} + 1.71 \times 10^{-5}e^{-6.04786 \times 10^{-5}t})\} \div 3.515 + 5.56 \times 10^{-3}T - 1.65 \times 10^{-5}T^2 + 1.69 \times 10^{-6}T^3} \quad (105)$$

Finalmente se obtienen los valores presentados desde la ecuación 106 a la 110.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{C + g(T)h(t)}{f(T)} \quad (106)$$

$$C = 238.51 \quad (107)$$

$$f(T) = 4.845 + 5.56 \times 10^{-3}T - 1.65 \times 10^{-5}T^2 + 1.69 \times 10^{-6}T^3 \quad (108)$$

$$g(T) = -0.939T - 0.012T^2 + 3.59 * 10^{-5}T^3 - 3.60 \times 10^{-6}T^4 + 352.58(T - 374.14)^{0.33052} \quad (109)$$

$$h(t) = -9.5 \times 10^{-7}e^{-2.7416 \times 10^{-6}t} - 4.02 \times 10^{-5}e^{-5.7737 \times 10^{-5}t} + 1.71 \times 10^{-5}e^{-6.04786 \times 10^{-5}t} \quad (110)$$

## Capítulo 3

### Modelación y resultados: Simulación en Ansys® Workbench

#### 3.1. Consideraciones

##### 3.1.1. Consideraciones geométricas de la muestra

Para la modelación del fenómeno de transferencia de calor, se ha considerado una geometría similar a la que tendría el objeto de prueba en la realidad. En este caso, se tiene presente dentro de la simulación un cilindro corto de diámetro 6 cm y altura 1 cm, como se aprecia en la figura 12.

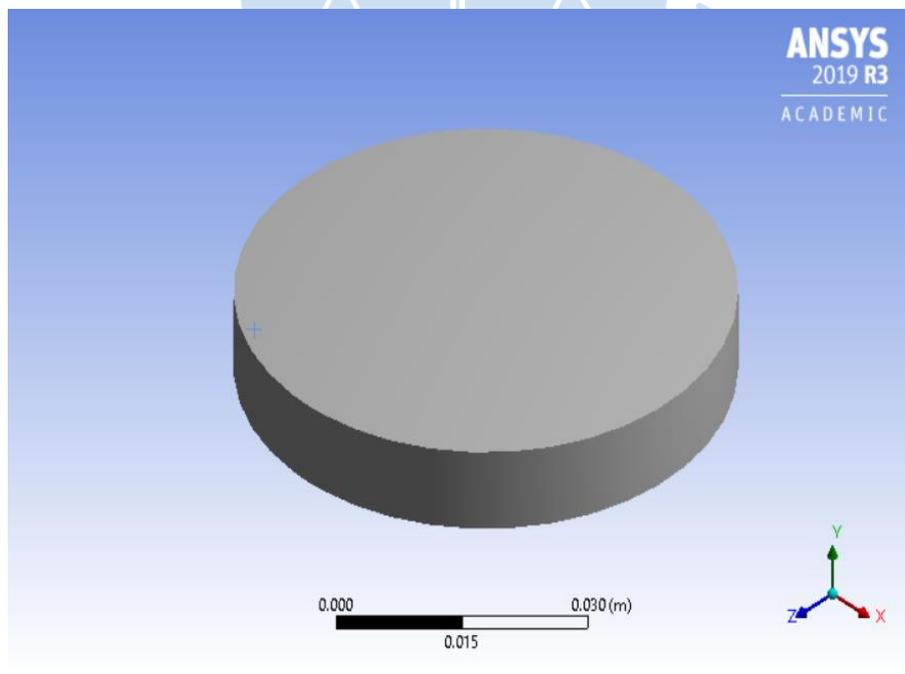


Figura 12 Modelación de la geometría para muestra en Ansys® Workbench 2019

Fuente: Elaboración propia

Adicional a lo expuesto líneas arriba, se ha decidido implementar un entorno para la pieza de papa. Las dimensiones de la cavidad del horno se precisan en (D. D. E. L. A. S. Microondas, 2012). Luego, se hace una pequeña plataforma para simular las dimensiones de plato giratorio dentro de la cavidad, con un diámetro de 90 mm y 10 mm de alto, donde no se concentran los efectos del fenómeno de radiación. Los detalles de la configuración geométrica se detallan en la figura 13 y 14, al efectuar una vista de sección de la geometría de manera longitudinal.

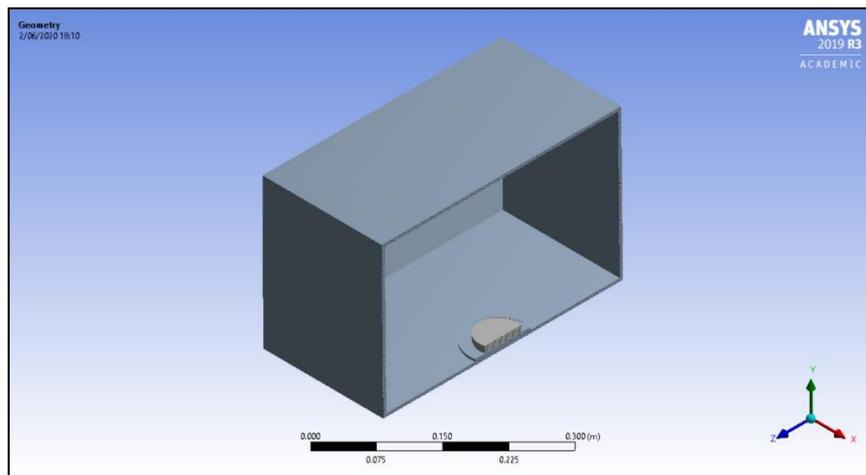


Figura 13 Vista isométrica de sección - papa en cavidad de horno microondas

Fuente: Elaboración propia

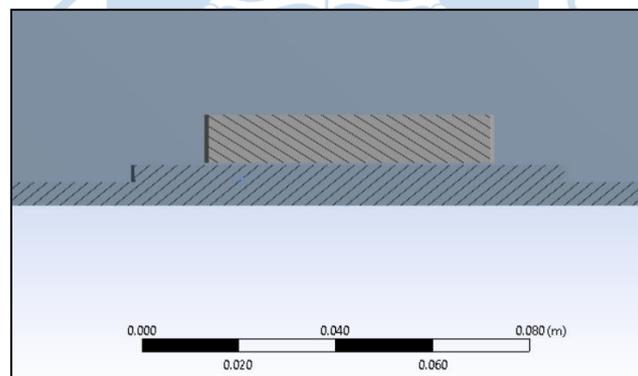


Figura 14 Vista frontal en sección - papa en cavidad de horno

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Consideraciones en las propiedades para la muestra

Para continuar con la simulación, es necesario que el material en cuestión cuente con propiedades que correspondan a las del espécimen de papa que se estudiará. Es por ello que se ha tomado un valor promedio a partir de las investigaciones llevadas a cabo en (Pérez Suelo, 2017), (Castro, 1986), (Zegarra, 2014), (Rodas, 2019) y (Plaza, 2015). Las propiedades se definen en la tabla 8.

Tabla 8.

*Propiedades de la muestra.*

| Símbolo      | Propiedad                             | Magnitud             | Unidades          |
|--------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------|
| $\rho$       | Densidad                              | 1040                 | kg/m <sup>3</sup> |
| k            | Conductividad Térmica                 | 0.554                | W/K.m             |
| $c_p$        | Calor Específico                      | 3515                 | J/Kg.K            |
| $\epsilon''$ | Coefficiente de Perdidas Dieléctricas | 17                   | adimensional      |
| $\alpha$     | Difusividad térmica                   | $1.44 \cdot 10^{-7}$ | m <sup>2</sup> /s |

Fuente: (Pérez Suelo, 2017), (Castro, 1986), (Zegarra, 2014), (Rodas, 2019) y (Plaza, 2015)

Luego, se ingresan los valores como un nuevo material dentro de la matriz de Ansys®, al que se ha denominado Papa Peruana como parte de la sección *Engineering Data*, según se muestra en la figura 15.

The screenshot shows the ANSYS Engineering Data interface. The top window is titled 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' and contains a table with columns A, B, C, D, and E. Row 4 is highlighted, showing the material 'Papa Peruana' with a source of 'D:\Ciclo...'. Below this, a 'Properties of Outline Row 4: Papa Peruana' window is open, displaying a table of material properties:

| Property                       | Value | Unit                               |
|--------------------------------|-------|------------------------------------|
| Material Field Variables       | Table |                                    |
| Density                        | 1040  | kg m <sup>-3</sup>                 |
| Isotropic Thermal Conductivity | 0.554 | W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>  |
| Specific Heat, C <sub>p</sub>  | 3515  | J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |

Figura 15 Configuración de los valores para la pieza de papa en módulo de material

Fuente: Elaboración propia

Con esta configuración, se podrá asignar las propiedades del material en cuestión a la geometría dibujada, de tal modo que la simulación se asemeje en su mayoría a las condiciones reales.

### 3.1.3. Mallado del elemento

Como parte de la simulación es necesario realizar el mallado del sólido de pruebas para resolver las ecuaciones de transferencia de calor en algunos puntos característicos del elemento. Para la simulación, la operación de mallado automático que brinda el software ANSYS®.

Como se aprecia en la figura 16, el mallado del sólido es irregular y, pero los resultados del estudio no se ven afectados debido a las consideraciones del material. Además, la estructura de la malla mostrará valores de concordancia con las recomendaciones dadas en (Plaza, 2015) y (Sablani & Mujumdar, 2006).

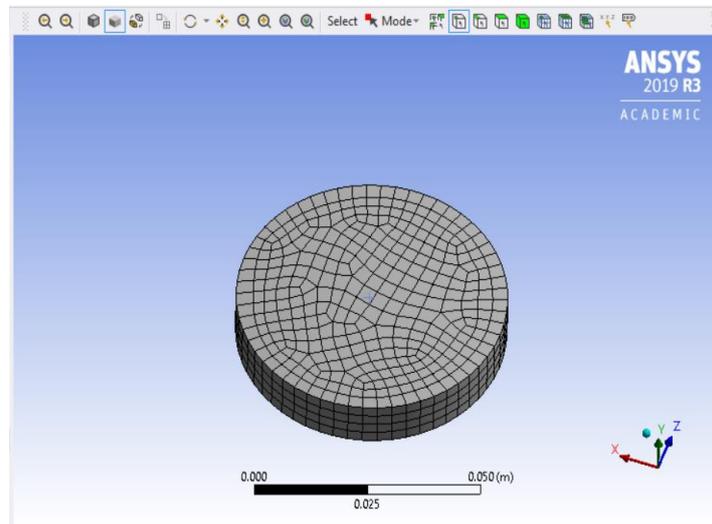


Figura 16 Mallado de elemento para simulación de radiación

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4. Consideraciones de la simulación de temperatura y flujo interno

#### 3.1.4.1. Asignación de propiedades de “Papa Peruana”

Para lograr condiciones cercanas a la realidad dentro del elemento, se emplea transferencia de calor en estado transitorio (*Transient Thermal* dentro de la figura 17). De esa manera, se puede designar a la pieza de papa dibujada como sólido posea las propiedades deseadas para el análisis.

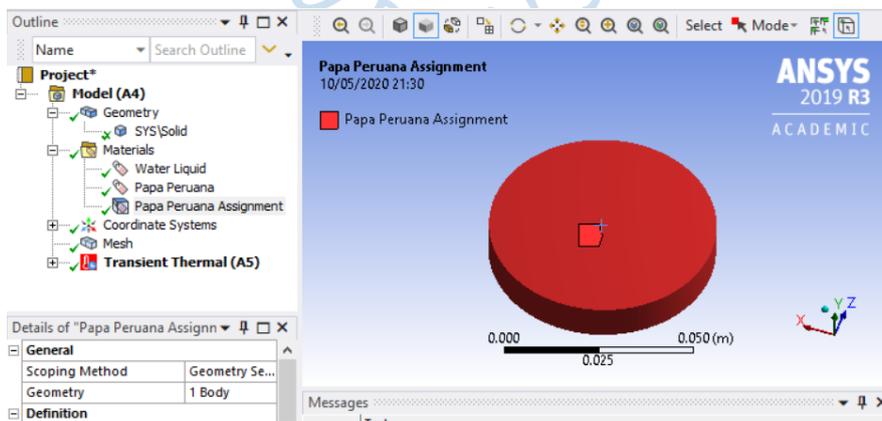


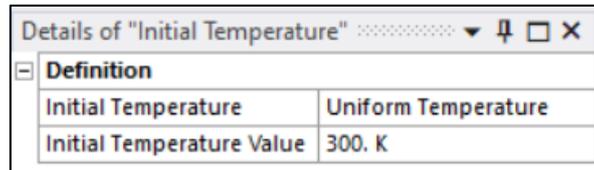
Figura 17 Asignación de propiedades de Papa Peruana a elemento de prueba

Fuente: Elaboración propia

Luego, dentro de las consideraciones a indicar en el sistema, se realiza la asignación de valores.

### 3.1.4.2. Temperatura inicial

Se indica el valor de 27°C (300K) como temperatura inicial, donde el medio se encuentra a temperatura ambiente. El valor se asigna como se puede ver en la figura 18.



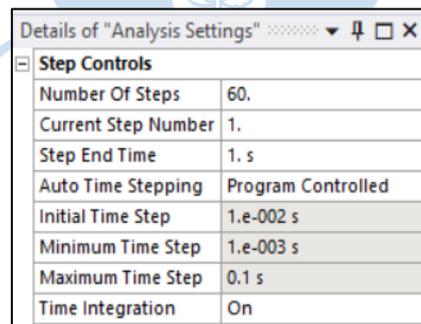
| Definition                |                     |
|---------------------------|---------------------|
| Initial Temperature       | Uniform Temperature |
| Initial Temperature Value | 300. K              |

Figura 18 Asignación de valor para temperatura inicial

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4.3. Tiempo de simulación

En la sección denominada *Analysis Settings*, se determina el tiempo de simulación y la cantidad y duración de las subsecciones de tiempo para obtener las condiciones de los puntos presentados en la figura 19. Luego de haber evaluado las prestaciones del software y analizando la disponibilidad de los recursos computacionales, se decidió por un tiempo inicial de simulación de 60 segundos, divididos en 60 secciones de 1 segundo cada una, esto siguiendo las recomendaciones y tiempos promedio expuestos en (Sablani & Mujumdar, 2006). Los demás parámetros siguen predeterminados por el software y se ajustarán según las necesidades que se presenten.



| Step Controls       |                    |
|---------------------|--------------------|
| Number Of Steps     | 60.                |
| Current Step Number | 1.                 |
| Step End Time       | 1. s               |
| Auto Time Stepping  | Program Controlled |
| Initial Time Step   | 1.e-002 s          |
| Minimum Time Step   | 1.e-003 s          |
| Maximum Time Step   | 0.1 s              |
| Time Integration    | On                 |

Figura 19 Determinación del tiempo para simulación

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4.4. Radiación

Se agrega el fenómeno de radiación al estudio. Como parte de la configuración se determina que este se dé en las 3 caras de la muestra, con una emisividad de prueba de 1 y con la temperatura del ambiente a 27°C (300K) tal y como lo ilustra la Figura 20. Además, se indica

que el fenómeno se dé bajo la opción *Surface to Surface* entre las paredes de la cavidad de horno para simular las condiciones del microondas (indicadas en la figura 21).

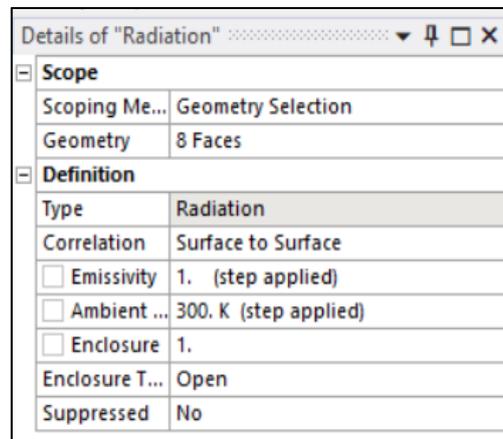


Figura 20 Parámetros para la simulación del fenómeno de radiación

Fuente: Elaboración propia

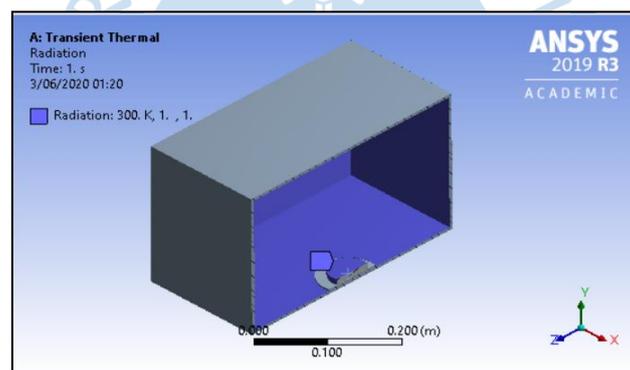


Figura 21 Configuración de caras para la radiación bajo el método *Surface to Surface*

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4.5. Flujo de calor interno

Como parte del fenómeno de radiación estudiado, simulamos el flujo de calor que se genera al interior de los cuerpos donde la radiación ha incidido por medio de la función *Internal Heat Generation*. En la sección 1.4.1 se presentaron las ecuaciones con las que se puede determinar la magnitud de este valor a partir de las propiedades mencionadas al inicio de la sección 3.1.2. Se establecen las constantes dadas anteriormente, y para calcular el valor de  $E_{rms}$  se utiliza la ecuación 13, en la cual se establece como valor de pico del campo eléctrico a 1000 V/m. Operando con ese valor se obtiene el resultado desarrollado en la ecuación 111.

$$\dot{q}_{gen} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_{rms}|^2 = 136293.7406 \text{ W/m}^3 \quad (111)$$

Este valor se determina dentro del estudio de transferencia de calor como se observa en la figura 22.

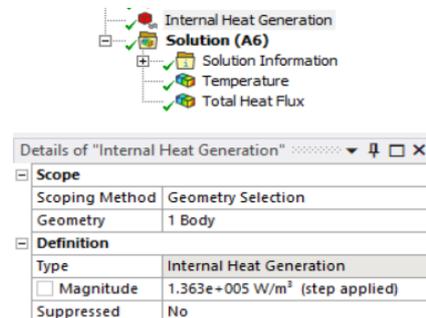


Figura 22 Parámetros para la simulación del fenómeno de generación interna de calor

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5. Consideraciones de la simulación cambio de fase

#### 3.1.5.1. Herramienta

Para realizar la simulación de cambio de fase se ha usado la herramienta “Fluid Flow (Fluent)” mostrada en la figura 23, pues en esta permite realizar el cambio de fase de agua líquida a vapor de agua, y la transición de este a través de un medio poroso.

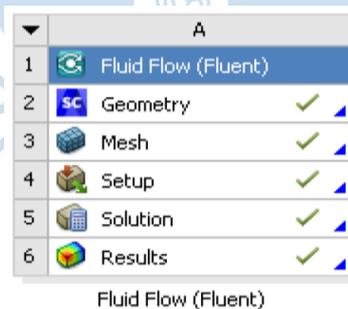


Figura 23 Ventana de herramienta FLUID FLOW

Fuente: Elaboración propia

#### 3.1.5.2. Simplificaciones del modelo empleado

A partir de las investigaciones realizadas y detalladas en la sección 1.7., el marco en el cual se desarrollan los fenómenos implicados en esta clase de pruebas se encuentra aún en investigación, con lo que softwares comerciales normalmente se encuentra limitados a ciertos fenómenos de interés común. Detallado esto, se realizaron las siguientes simplificaciones de la simulación:

- El medio en donde se desarrolla la simulación se compone de 2 zonas delimitadas por las geometrías anteriormente mostradas: un cilindro de pequeña altura y una cavidad rectangular y se encuentran ocupadas por agua líquida y aire respectivamente.
- La pieza de papa se modela como un contenedor hueco ocupado al porcentaje de agua correspondiente a la muestra de papa según especie tomada como referencia, diferente a lo mostrado en la realidad donde el agua se encuentra en conjunto con el almidón sólido.
- La energía proviene de un medio a la temperatura de evaporación del agua, para generar el cambio de fase. Siendo así, las paredes del medio se encuentran a 373K.
- La superficie superior de la papa se encuentra descubierta, pues al ser esta un área de mayor magnitud y encontrarse a menor distancia al centro (que es donde se origina la generación de calor volumétrica), los fenómenos de transferencia de calor y masa se verán en magnitudes mayores a través de esta sección.

### 3.1.5.3. Cambio en la geometría y mallado de la simulación

Para este caso, se cambian las condiciones en las configuraciones geométricas trabajadas. Se emplean las operaciones booleanas para generar 2 secciones separadas. Con ello, se presentan ambas cavidades en la figura 24. Además, se definen las zonas correspondientes a la cavidad de horno (que se encontrará ocupada por aire como fluido), paredes laterales e inferior de papa (que actuarán como contenedor y se encontrarán ocupadas por agua a un 79% de volumen) como se detalla en el anexo 6, respectivamente, que son las zonas límites. Finalmente, se reconfigura el mallado a partir de la nueva geometría tal y como se aprecia en la figura 25.

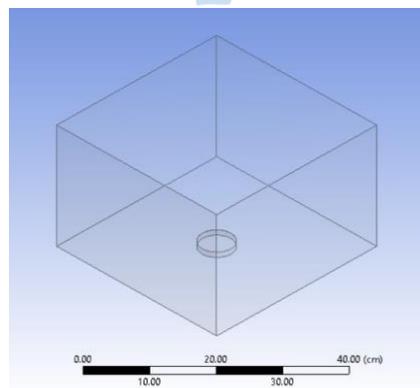


Figura 24 Zonas definidas para simulación en modulo Fluent

Fuente: Elaboración propia

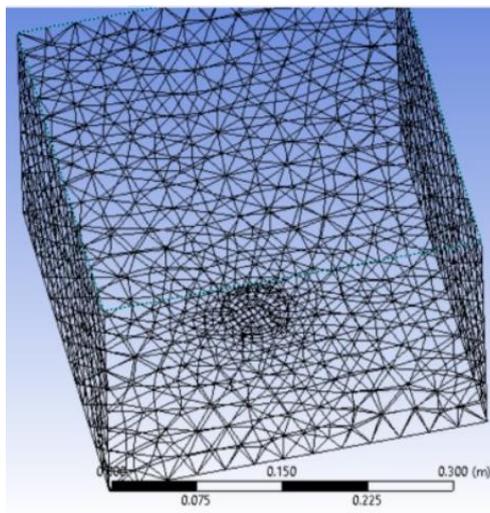


Figura 25 Reelaboración de malla para simulación en módulo Fluent

Fuente: Elaboración propia

#### 3.1.5.4. Cambio de fase

Se ha activado el modelo de fase en el módulo multifase, para el cual la fase uno es agua líquida y la fase dos es vapor de agua, y la evaporación se da a 373 K, se considera también en esta parte la tensión superficial que ejerce el agua en la superficie como  $0.072 \text{ N/m}^2$ . Además, se muestra la configuración del módulo Energy y Modelo de Viscosidad dentro del software desde la figura 26 a la 32 respectivamente.

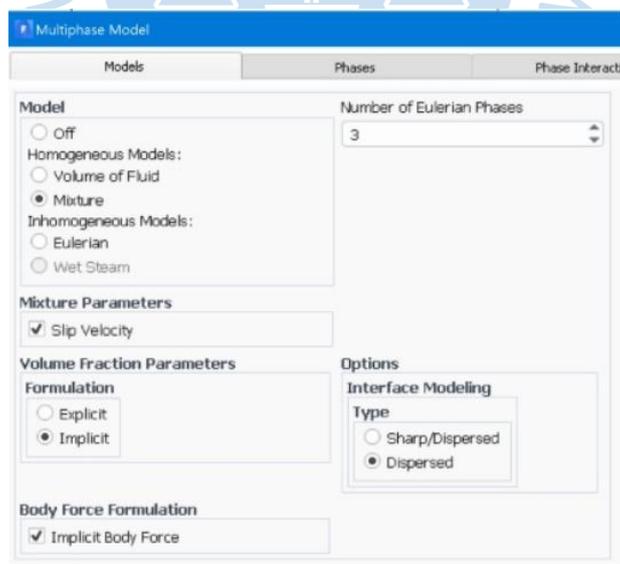


Figura 26 Configuración inicial para modelo multifase

Fuente: Elaboración propia

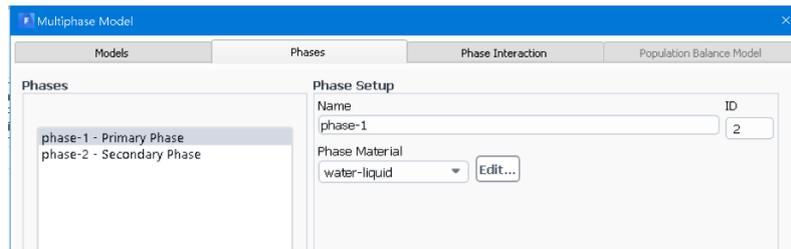


Figura 27 Configuración de parámetro para fase agua líquida

Fuente: Elaboración propia

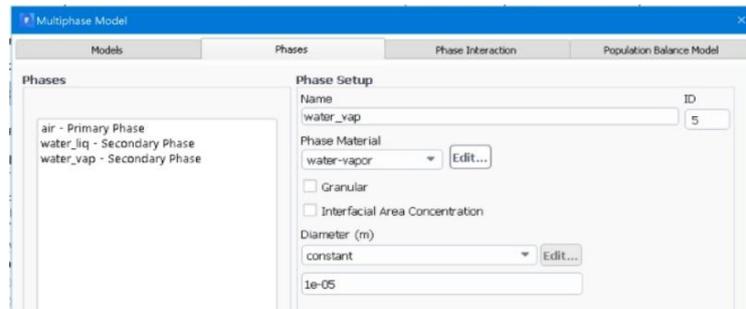


Figura 28 Configuración de parámetro para fase vapor de agua

Fuente: Elaboración propia

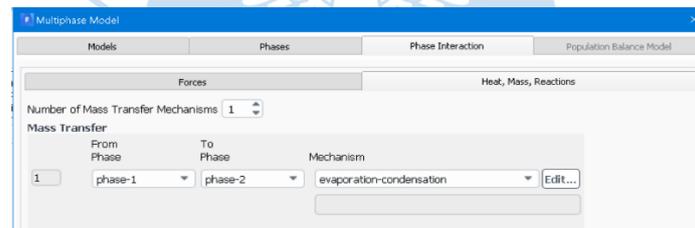


Figura 29 Configuración de parámetro para cambio de fase 1 a 2

Fuente: Elaboración propia

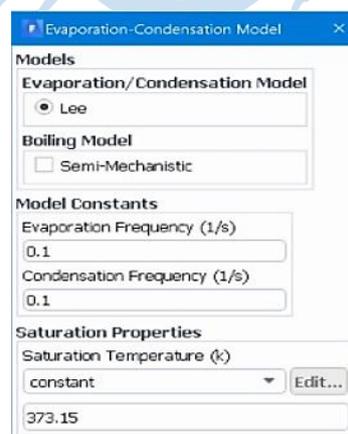


Figura 30 Configuración de propiedades para cambio de fase 1 a 2.

Fuente: Elaboración propia



Figura 31 Configuración de parámetro para tensión superficial

Fuente: Elaboración propia

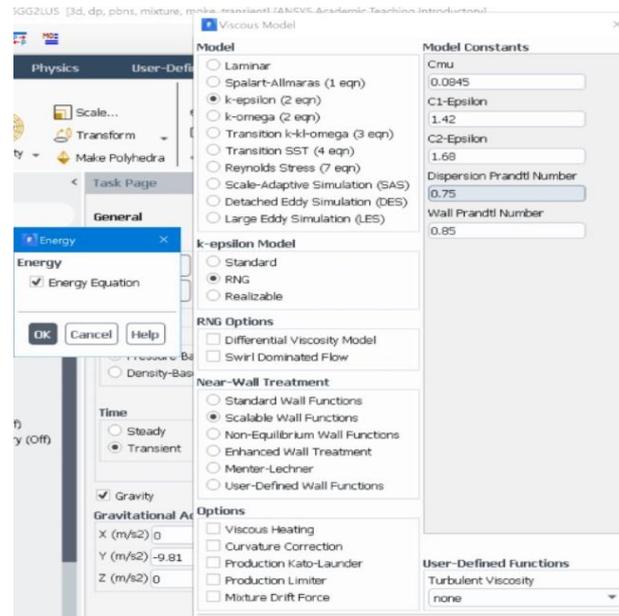


Figura 32 Configuración de los parámetros en el módulo Energy y Viscous Model

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5.5. Medio poroso

El agua no está en un medio libre, por tanto, se debe indicar el porcentaje de porosidad según la ecuación 112.

$$\text{Porcentaje de porosidad} = \frac{\text{Volumen de espacios vacíos}}{\text{Volumen total}} \quad (112)$$

Se considera al agua en un medio poroso donde los espacios vacíos son aquellos donde se encuentra el agua, el cual se ha definido en la ecuación 113.

$$\text{Porcentaje de porosidad} = \frac{0.79}{1} = 0.79 \quad (113)$$

Se ha considerado 0.79 como volumen del agua con relación al total 1 debido a la humedad inicial de la papa ya descrita anteriormente y se ha introducido a la simulación como muestra la figura 33.

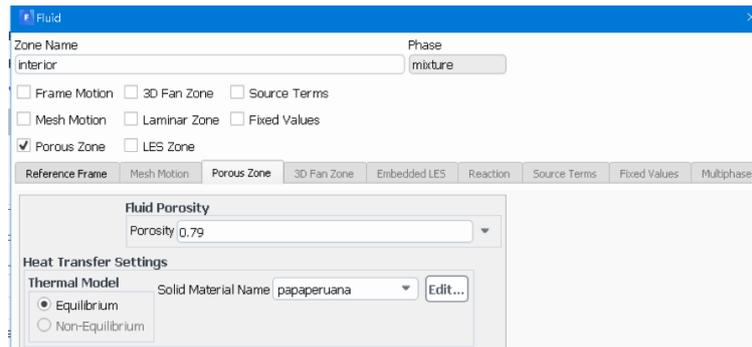


Figura 33 Configuración de parámetro para porcentaje de porosidad

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5.6. Fuente de calor

La fuente de calor tiene el valor del flujo de calor generado por la radiación microondas dado en la ecuación 111 e introducida al software en la figura 34 y 35.

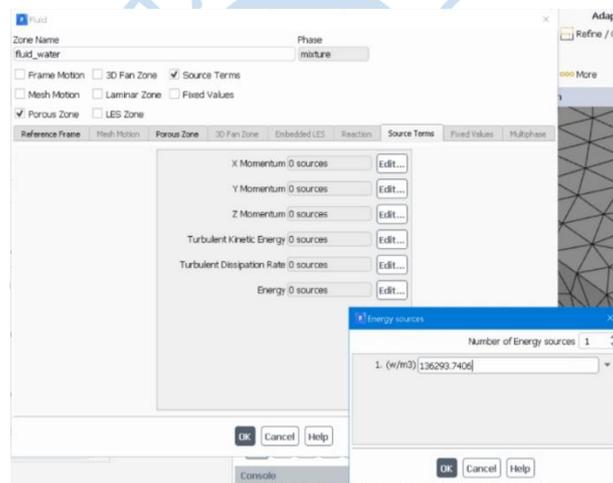


Figura 34 Configuración parámetro flujo de calor

Fuente: Elaboración propia

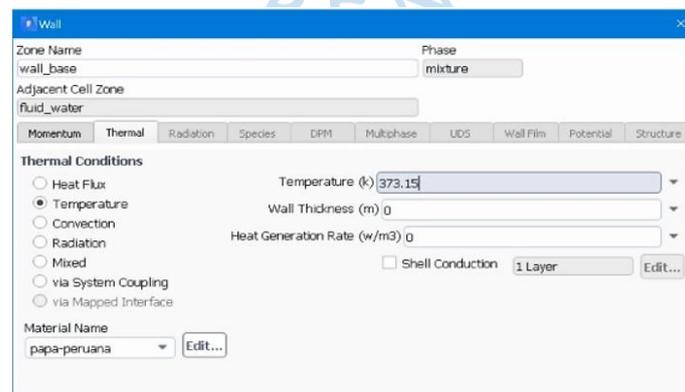


Figura 35 Configuración de parámetros en pared para muestra de papa

Fuente: Elaboración propia

## 3.2. Resultados

### 3.2.1. Temperatura

Para la prueba, se monitorea la temperatura en todo el sólido de ensayo. Luego de las simulaciones se ha determinado el perfil de temperatura en la figura 36 y la evolución del valor de temperatura se evidencia en la figura 37.

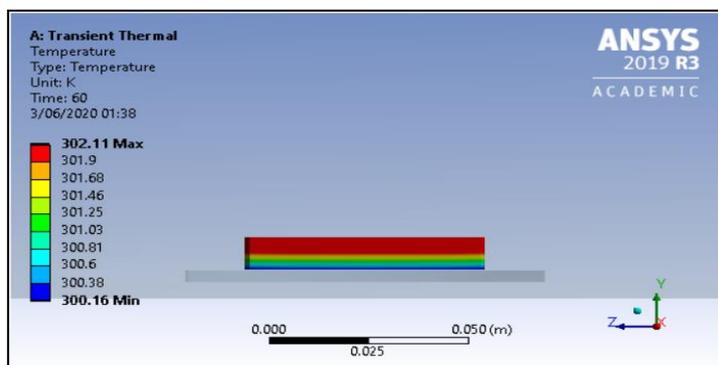


Figura 36 Perfil de temperaturas para la pieza de papa

Fuente: Elaboración propia

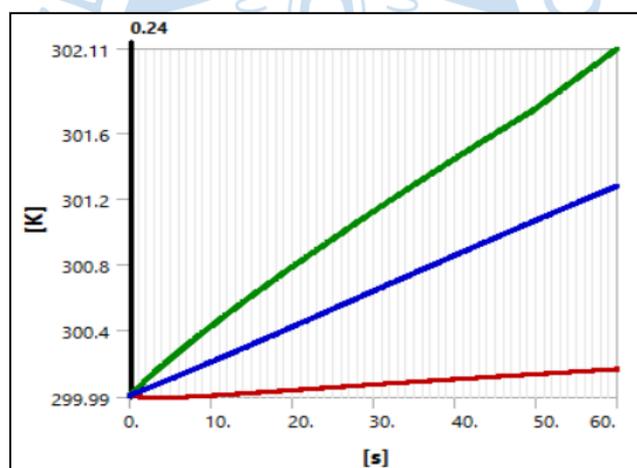


Figura 37 Gráfica Temperatura vs tiempo para la pieza de papa

Fuente: Elaboración propia

En rojo se indica el valor de temperatura menor registrado durante la simulación; en verde, la mayor temperatura y en azul, un promedio de temperaturas.

### 3.2.2. Flujo de calor

El perfil obtenido colocado como vista de sección se muestra en la figura 38 y la gráfica en la figura 39.

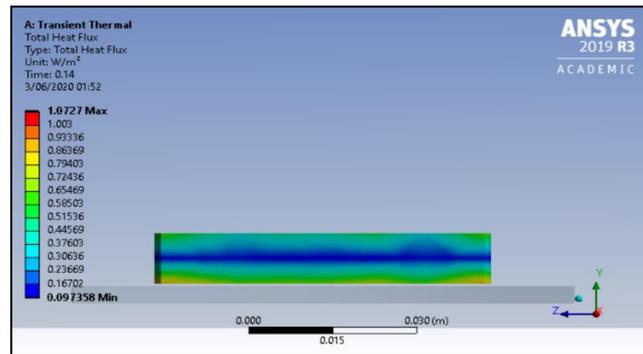


Figura 38 Perfil de flujo de calor total en la pieza de papa

Fuente: Elaboración propia

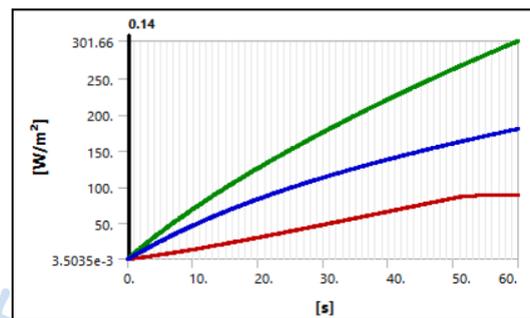


Figura 39 Gráfica Flujo de calor vs tiempo para pieza de papa

Fuente: Elaboración propia

En rojo se indica el valor de flujo de calor de menor magnitud registrado durante la simulación; en verde, el flujo con mayor valor y en azul, la evolución de los flujos de calor en los elementos del mallado.

### 3.2.3. Fracción de volumen de agua en estado líquido y gaseoso

#### 3.2.3.1. Fracción de agua en estado líquido

El perfil de volumen obtenido se aprecia en la figura 40, 41 y 42 respectivamente.

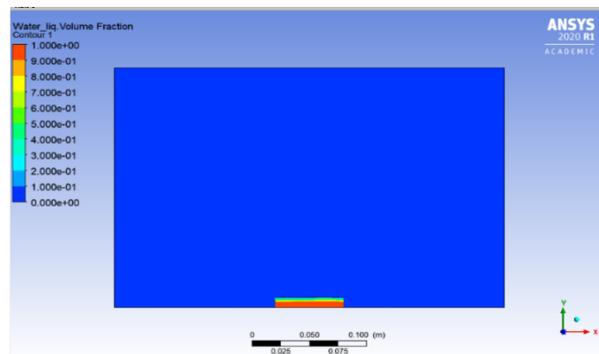


Figura 40 Fracción de agua en estado líquido para el instante inicial

Fuente: Elaboración propia

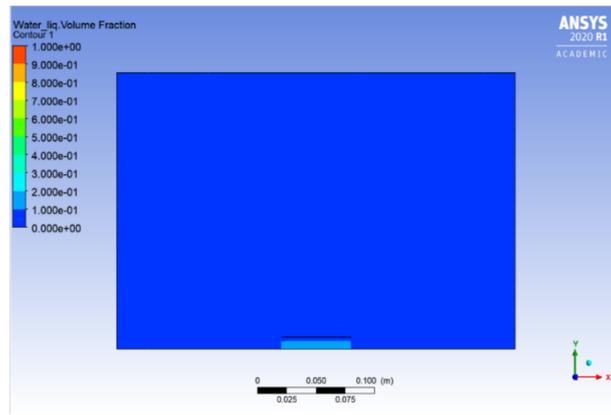


Figura 41 Fracción de agua en estado líquido luego de aproximadamente 220 segundos.

Fuente: Elaboración propia

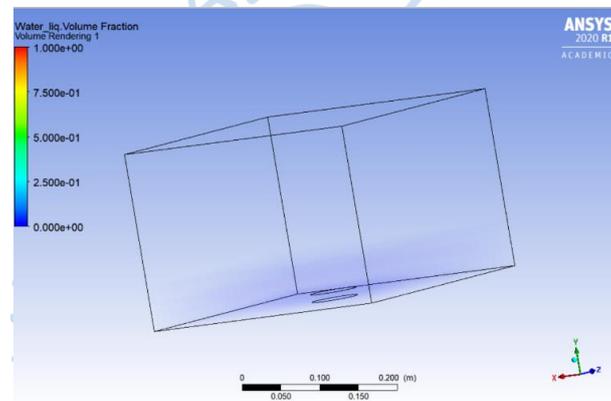


Figura 42 Fracción de agua líquida en las paredes de la cavidad

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3.2. Fracción de agua en estado gaseoso

La distribución de fracción de vapor en estado gaseoso se muestra en las Figuras 43 y 44.

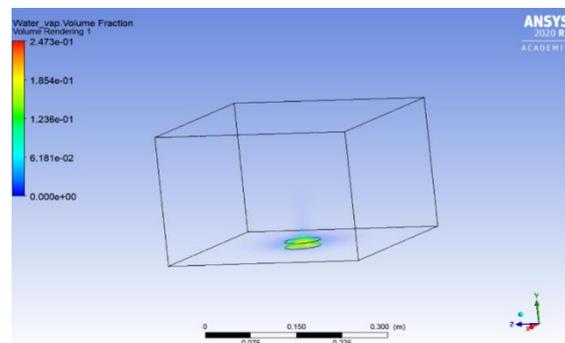


Figura 43 Fracción de vapor de agua en los primeros segundos

Fuente: Elaboración propia

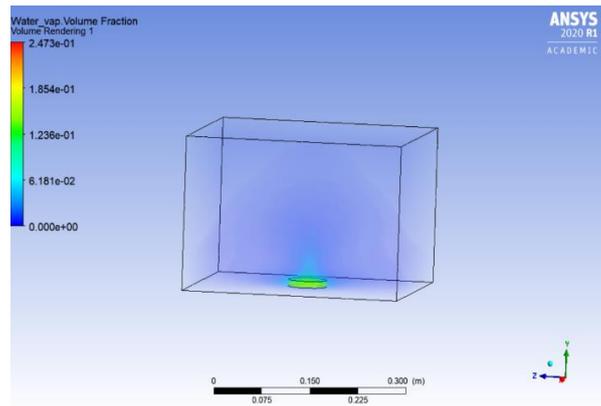


Figura 44 Fracción de vapor luego de aproximadamente 220 segundos

Fuente: Elaboración propia



## **Capítulo 4**

### **Discusión de resultados**

#### **4.1. Evaluación de parámetros definidos**

##### **4.1.1. Temperatura**

Como se puede observar en las Figuras 37 y 38, la evolución de la temperatura se da de manera progresiva hacia valores de temperatura cada vez mayores en intervalos de tiempo grandes. Esto corresponde a lo visto en procesos de secado reales, donde la temperatura del medio influye en gran medida sobre el proceso de secado, haciendo necesario colocar la pieza en un ambiente de temperatura cercano al valor deseado (en este caso, uno que corresponda a los valores de evaporación). Esto por la naturaleza de los fenómenos térmicos que ahí se desarrollan, siendo estos por lo general lentos.

##### **4.1.2. Volumen de agua en estado líquido**

Al apreciar la fracción de volumen de agua líquida en la Figura 41 que esta disminuye considerablemente en poco tiempo. Esto coincide con las características principales de la deshidratación por microondas, pues alrededor de aproximadamente 220 segundos se observa que la fracción en este estado ha llegado al 10%. Si se observa este estado en el volumen renderizado se puede apreciar agua líquida en las paredes bajas y en la base en una pequeña cantidad, esto se puede entender como condensación de vapor, pues las paredes el calentamiento de las paredes de la cavidad del microondas es casi nulo en comparación con el de la muestra, por tanto, mantiene una temperatura cercana a la temperatura ambiente.

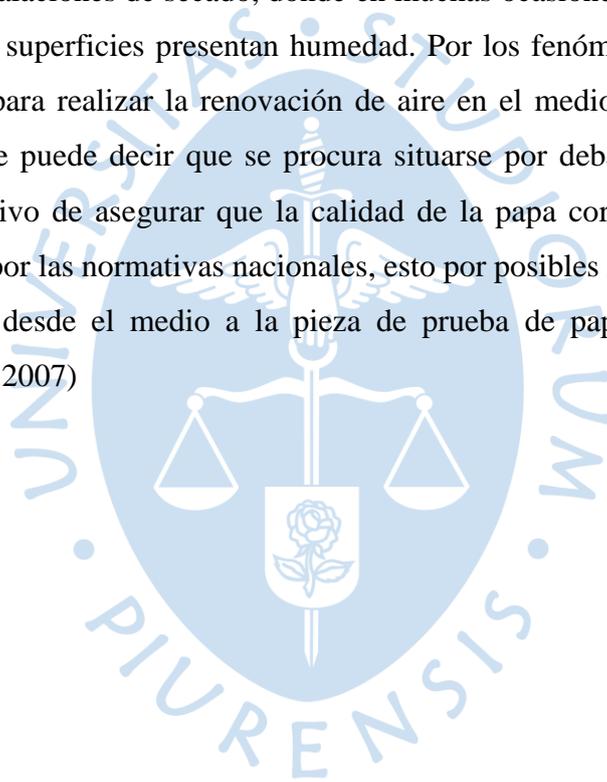
##### **4.1.3. Volumen de agua en estado gaseoso**

Al inicio de la simulación se observa el vapor concentrado en el espacio situado sobre la muestra y cerca a sus paredes laterales, para posteriormente expandirse en casi toda la cavidad del microondas. Se debe tener en cuenta también la fracción de volumen que quedará dentro de

la muestra cuando acabe el calentamiento, pues parte de este se quedará dentro de esta y será parte de la cantidad final de humedad de esta.

#### **4.2. Justificación de resultados**

Contrastado en la bibliografía antes consultada, los resultados con el tiempo propuesto concuerdan con los fenómenos observados en la industria, siendo esta clase de procesos más lentos en comparación con otros como calentamiento o convección de volumen de agua en las piezas de papa que se suelen calificar como deshidratada. Las distribuciones de volumen de agua en ambos estados dan una idea de cómo parte del volumen de agua se distribuye en la cavidad del horno en forma de vapor, concordando con las anotaciones que hacen respecto al estado final de las instalaciones de secado, donde en muchas ocasiones se satura parte del aire circundante y algunas superficies presentan humedad. Por los fenómenos antes expuestos se instalan ventiladores para realizar la renovación de aire en el medio y reducir el tiempo de secado. Finalmente, se puede decir que se procura situarse por debajo el valor del 10% de humedad con el objetivo de asegurar que la calidad de la papa corresponda a un producto calificado como seco por las normativas nacionales, esto por posibles retornos de agua (u otros fluidos no deseados) desde el medio a la pieza de prueba de papa. (Comité Técnico de Elaboración de Tunta, 2007)



## Conclusiones

**Primera.** La simulación generada por el software nos da un perfil de temperaturas con un gradiente que va desde la superficie inferior de la pieza de papa hasta la parte superior. Siendo así, podemos concluir que la mayor temperatura se concentra en la parte superior, cuya diferencia con la temperatura en la zona inferior es (según lo simulado), de aproximadamente 2°C.

**Segunda.** De manera preliminar, podemos intuir que la zona con mayor flujo de masa hacia el exterior se concentra en la parte superior del volumen estudiado debido a que presenta la mayor área superficial, además que el vapor de agua tiende a fluir desde la parte inferior a la parte superior. Sin embargo, esto sería solo durante los primeros instantes de transferencia de masa, ya que luego de retirar una gran cantidad de masas de agua (relativo al tamaño de la pieza), la energía necesaria se hace mayor conforme se reduce la cantidad del fluido.

**Tercera.** La zona de la parte superior se convierte entonces en la más propensa a perder propiedades de interés para el sólido deshidratado. Debido a la diferencia de temperaturas, es necesario considerar que las propiedades de carbohidratos, proteínas y lípidos son influenciadas ligeramente por la variación de temperatura, afectando su valor nutricional y la calidad final del producto.

**Cuarta.** Como parte del flujo de calor, podemos observar que este se hace mayor en las superficies inferiores. Esto cobra sentido al saber que el gradiente de temperatura va en dirección del eje Y negativo. Sin embargo, este se va uniformizando respecto al tiempo, con lo que podremos también deducir que los efectos de aumento de temperatura se replicarán finalmente en todo el sólido, pudiendo afectar las propiedades y aumentando la rigurosidad necesaria en la determinación del tiempo de exposición de la papa.

**Quinta.** A condiciones convencionales del proceso de secado de la papa, la transferencia de masa tiene mayor preponderancia que la transferencia de calor en casi todo el proceso, debido a que la difusividad de masa es menor a la difusividad térmica. Por otro lado, en la última parte del proceso, se logran alcanzar mayores niveles de temperatura, lo que hace que dicha preponderancia se invierta. Sin embargo, el proceso se desarrolla en mayor parte según lo mencionado en primera instancia.

**Sexta.** Habiendo obtenido como resultado tiempos de secado de la muestra relativamente cortos, se puede intuir que para la aplicación del secado de alimentos no solo se debe utilizar el medio propuesto (microondas), sino que debe complementarse con otros métodos y elementos como, por ejemplo, un ventilador para la recirculación del aire, para elevar la eficiencia del secado, lo cual se traduce desde el punto de vista económico en un ahorro significativo para volúmenes grandes de productos a secar.



## Recomendaciones

**Primera.** Se recomienda que el proceso se desarrolle en condiciones controladas, puesto que de dicho modo los resultados experimentales reflejarán más acertadamente las ecuaciones de transferencia de calor y masa que gobiernan el proceso.

**Segunda.** El seguimiento de un protocolo como el propuesto en el anexo 7, da una mayor garantía de obtener resultados más cercanos a los esperados por el modelo matemático del proceso.

**Tercera.** Repetir un mismo proceso un número determinado de veces les otorga mayor confiabilidad a los resultados obtenidos de dicho proceso, por lo cual es recomendable repetir un número aceptable de veces el proceso experimental para verificar si se realizó correctamente o si hubo alguna falla o interferencia al momento de realizarlo. ●

**Cuarta.** Se recomienda la revisión de diversas literaturas sobre el modelo matemático del proceso, ya que la mayoría de las ecuaciones o modelos que buscan describir los fenómenos físicos que se producen a lo largo de este y el comportamiento de los parámetros involucrados han sido desarrollados de manera experimental.

**Quinta.** Es recomendable que el planteamiento de las consideraciones que buscan simplificar el modelo sean las que permitan establecer un modelo matemático que refleje efectivamente el proceso tomando la mayor cantidad de condiciones reales del proceso: que no lleven el modelo a un escenario ideal, pero que tampoco conduzcan a un modelo tan complejo y resulte demasiado difícil de analizar.

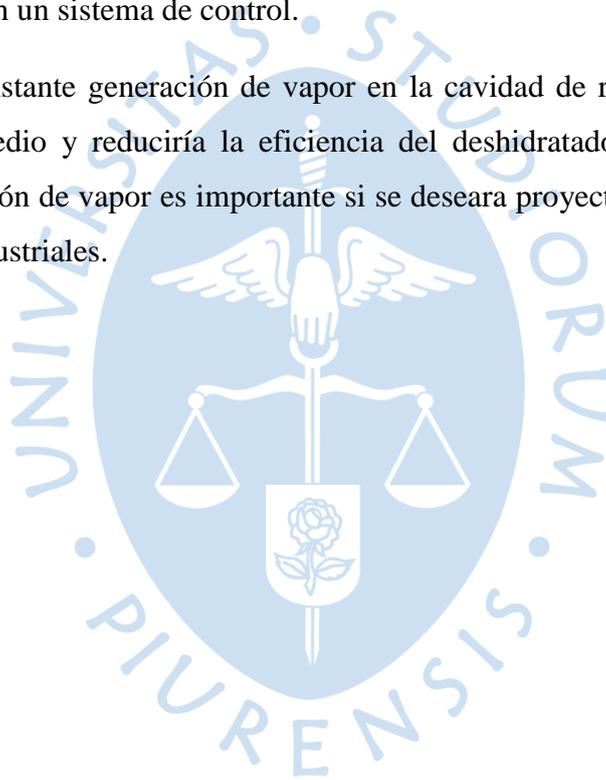
**Sexta.** Es recomendable plantear el modelo en base a las herramientas de las que se disponga para analizarlo. Por ejemplo, si se desea realizar un análisis de gran envergadura, se

requerirá una gran carga computacional para las simulaciones e instrumentos bastante especializados para el desarrollo experimental.

**Séptima.** Se recomienda que la implementación de elementos adicionales al sistema para la mejora del proceso de secado sea tal que permita un estudio adecuado del mismo, porque puede que excederse con dicha implementación lleve a un análisis bastante complicado.

**Octava.** Una de las principales ventajas del deshidratado por microondas es la velocidad de secado, pero esto puede llegar a ser contraproducente, pues una velocidad muy alta generaría altas presiones de vapor que terminarían fraccionando la muestra. Además, si la temperatura máxima llega a ser muy elevada se generarían costras en algunas zonas superficiales, por lo que es necesario contar con un sistema de control.

**Novena.** La constante generación de vapor en la cavidad de resonancia generaría una saturación de este medio y reduciría la eficiencia del deshidratado, por tanto, colocar un mecanismo de expulsión de vapor es importante si se deseara proyectar la materialización del proyecto a niveles industriales.



### Referencias bibliográficas

Castro, E. (1986). Propiedades Térmicas Alimentos. Universidad de Chile.

CDMX Electrónica. (s.f.). Sensor de humedad del suelo FC-28 Higrómetro. Obtenido de <http://www.cdmxelectronica.com/producto/sensor-de-humedad-del-suelo-higrometro/>

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones (Cuarta ed.). México: McGraw-Hill.

Comité Técnico de Elaboración de Tunta. (2007). Norma Técnica Peruana. Tubérculos Procesados. Obtenido de <http://cipotato.org/wp-content/uploads/publication%20files/books/004294.pdf>

Correa, L., & Hernández, E. (24 de Julio de 2011). Obtenido de SciELO: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-01952011000400002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952011000400002)

Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion (Segunda ed.). Londres: Oxford University Press.

D. D. E. L. A. S. Microondas. (2012). Horno de microondas. 1-52. Obtenido de [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno\\_de\\_microondas&oldid=60409963](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno_de_microondas&oldid=60409963)

Electrodomésticos, ©. B. (s.f.). Siemens. Obtenido de <https://www.siemens-home.bsh-group.com/es/inspiracion/innovaciones/novedades-producto/tabla-temperaturas-coccion-alimentos>

Fellows, P. (2000). Food processing technology, principles and practice. Ed. Woodhead.

García, C., Sierra, M., & Miranda, L. (2016). Modelado de la cinética de secado en microondas de ñame. Información Tecnológica, 27(1).

Grupo GIDOLQUIM. (28 de Marzo de 2014). Técnicas y operaciones avanzadas en el laboratorio químico (TALQ). Obtenido de <http://www.ub.edu/talq/es/node/247>

Gunasekaran, N. (2002). Effect of fat content and food type on heat transfer during microwave.

Hosain, D. (s.f.). Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices.

Luis Llamas. (19 de Enero de 2016). Recuperado el 08 de Mayo de 2020, de <https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/>

Menéndez, J. Á. (2017). Introducción al calentamiento microondas. En J. Á. Menéndez, & Á. H. Moreno (Edits.), *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas* (Primera ed., págs. 1 - 18). Latacunga, Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi.

Menéndez, J., & Moreno, A. (Edits.). (2017). *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas* (Primera ed.). Latacunga, Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi.

Metaxas, A., & Meredith, R. (1983). *Industrial Microwave Heating*. Londres: Peter Peregrinus Ltd.

Moreno, A., Hernández, R., & Ballesteros, I. (2017). Secado industrial con energía microondas. En J. Á. Menéndez, & Á. H. Moreno (Edits.), *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas* (Primera ed., págs. 85 - 118). Latacunga, Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi.

Mujumdar, A. (2006). *Handbook of Industrial Drying* (Tercera ed.). Taylor & Francis Group, LLC.

Nasr, A. (2018). *Microwave Drying*.

Naylamp Mechatronics. (s.f.). Recuperado el 08 de Mayo de 2020, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/331-transmisor-para-termocupla-max6675.html>

Orsat, V., Changrue, V., & Raghavan, V. G. (2006). Microwave drying of fruits and vegetables. *Stewart Postharvest Review*.

Pérez Suelo, D. B. (2017). Simulación de la variación de temperatura interna por efecto de la temperatura de almacenamiento, variedad de papa y forma de almacenaje. Universidad Nacional del Centro del Perú Facultad.

Pitchai, K. (Mayo de 2011). Electromagnetic and Heat Transfer Modeling of Microwave Heating in Domestic Ovens. Obtenido de Dissertations, Theses, & Student Research in Food Science and Technology: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1038&context=foodscidiss>

Plaza, P. (Noviembre de 2015). Control de la temperatura en sistemas de calentamiento por microondas. Valencia, España.

Pumisacho, S. (2002). El cultivo de la papa en el Ecuador. INIAP, 21-161.

Rodas, M. (2019). Determinación de las propiedades termofísicas (conductividad y difusividad térmica) en cinco variedades de papas nativas. Universidad Nacional José María Arguedas.

Romero, R. (2019). Deshidratación de la papa (*Solanum Tuberosum*) de descarte del Mercado Mayorista de Piura para la obtención de papa seca para uso alimenticio.

Sablani, A., & Mujumdar, A. (2006). Drying of Potato, Sweet Potato, and Other Roots. En Handbook of Industrial Drying (págs. 4-5). Taylor and Francis Group.

Samsung Electronics Co., Ltd. (2004). Manual de Usuario Horno Microondas MG1045. Tailandia.

Sutar, P., & Prasad, S. (2008). Microwave Drying Technology-Recent Developments and R&D Needs in India. Indian Institute of Technology, Kharagpur.

Wikipedia. (s.f.). Contenido de Agua. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Contenido\\_de\\_agua](https://es.wikipedia.org/wiki/Contenido_de_agua)

Zegarra, G. (2014). Propiedades térmicas de los alimentos - balance de masa y otras variables en la industria frutícola - factores que influyen en la evaluación sensorial de los alimentos.



**Anexos**





**Anexo 1.** Números adimensionales usados para el análisis.

| Nombre                                     | Definición                          |
|--|-------------------------------------|
| Número de Biot para transferencia de calor | $Bi_H = h_H d / 2k$                 |
| Número de Biot para transferencia de masa  | $Bi_M = h_M d / 2\rho\Delta$        |
| Número de Gukhman                          | $Gu = (T_A - T) / T_A$              |
| Factor de transferencia de calor           | $j_H = StPr^{2/3}$                  |
| Factor de transferencia de masa            | $j_M = (h_W / u_A \rho_A) Sc^{2/3}$ |
| Número de Nusselt                          | $Nu = h_H d / k_A$                  |
| Número de Prandtl                          | $Pr = c_p \mu / k_A$                |
| Número de Reynolds                         | $Re = u_A \rho_A d / \mu$           |
| Número de Schmidt                          | $Sc = \mu / \rho_A D_A$             |
| Número de Sherwood                         | $Sh = h_M d / \rho_A D_A$           |
| Número de Stanton                          | $St = h_H / u_A \rho_A c_p$         |

Fuente: Tomado de "Handbook of industrial drying" (Mujumdar, 2006)

Donde  $c_p$  es calor específico (kJ/(kg.K));  $d$ , diámetro de partícula (m);  $D$ , difusividad en el sólido (m<sup>2</sup>/s);  $D_A$ , difusividad de vapor en el aire (m<sup>2</sup>/s);  $\varepsilon$ , fracción de vacío en lecho empacado;  $G$ , flujo másico de aire (kg/(m<sup>2</sup>/s));  $h_H$ , coeficiente de transferencia de calor (kW/(m<sup>2</sup>K));  $h_M$ , coeficiente de transferencia de masa (kg/(m<sup>2</sup>K));  $h_{vH}$ , coeficiente de transferencia de calor volumétrico (kW/(m<sup>3</sup>K));  $h_{vM}$ , coeficiente de transferencia de masa volumétrico (kg/(m<sup>3</sup>/s));  $k$ , conductividad térmica del sólido (kW/(m.K));  $k_A$ , conductividad térmica del aire (kW/(m.K));  $\mu$ , viscosidad dinámica del aire (kg/(m.s));  $Nu'$ ,  $Nu' = Nu * \varepsilon / (1 - \varepsilon)$ ;  $\rho_A$ , densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>);  $Re'$ ,  $Re' = Re(1 - \varepsilon)$ ;  $Re_s$ ,  $Re$  basado en  $u_s$  en lugar de  $u$ ;  $T_A$ , temperatura del aire (°C);  $T$ , temperatura del material (°C);  $u_A$ , velocidad del aire (m/s) y  $u_s$ , la velocidad del aire para chorros iniciales (m/s). (Mujumdar, 2006)

**Anexo 2.** Analogía entre la conducción y la difusión transitorias en un medio en reposo.

| Conducción de calor                                      | Difusión de Masa   |
|--|--|
| $T$  | $C, y, \rho$ o $w$   |
| $\alpha$   | $D_{AB}$   |
| $\theta = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ | $\theta_{masa} = \frac{w_A(X, t) - w_{A, \infty}}{w_{A, 0} - w_{A, \infty}}$ |
| $\frac{T(x, t) - T_s}{T_0 - T_s}$                        | $\frac{w_A(X, t) - w_A}{w_{A, 0} - w_A}$                                     |
| $\xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$                       | $\xi_{masa} = \frac{x}{2\sqrt{D_{AB} t}}$                                    |
| $Bi = \frac{h_{conv} L}{k}$                              | $Bi_{masa} = \frac{h_{masa} L}{D_{AB}}$                                      |
| $\tau^* = \frac{\alpha t}{L^2}$                          | $\tau^* = \frac{D_{AB} t}{L^2}$  |

Fuente: Tomado de "Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones" (Cengel & Ghajar, 2011)

Anexo 3. Valores correspondientes a la figura 9.

| T (°C) | T (K)  | X (kg/kg db) | k (W/mK)   | D <sub>AB</sub> (m <sup>2</sup> /s) | alpha (m <sup>2</sup> /s) | alpha/D <sub>AB</sub> |
|--------|--------|--------------|------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 25     | 298.15 | 0.01         | 0.01266873 | 1.87348E-11                         | 3.46557E-09               | 184.980528            |
| 25     | 298.15 | 0.05         | 0.03546231 | 2.70168E-11                         | 9.70082E-09               | 359.066151            |
| 25     | 298.15 | 0.1          | 0.06162311 | 3.65223E-11                         | 1.68572E-08               | 461.558652            |
| 25     | 298.15 | 0.15         | 0.08550906 | 4.52012E-11                         | 2.33913E-08               | 517.491529            |
| 25     | 298.15 | 0.2          | 0.10740452 | 5.31569E-11                         | 2.93808E-08               | 552.718627            |
| 25     | 298.15 | 0.25         | 0.12754834 | 6.04762E-11                         | 3.48912E-08               | 576.941787            |
| 25     | 298.15 | 0.3          | 0.14614263 | 6.72324E-11                         | 3.99777E-08               | 594.620476            |
| 25     | 298.15 | 0.35         | 0.16335957 | 7.34881E-11                         | 4.46875E-08               | 608.091274            |
| 25     | 298.15 | 0.4          | 0.17934673 | 7.9297E-11                          | 4.90608E-08               | 618.696747            |
| 25     | 298.15 | 0.45         | 0.19423133 | 8.47053E-11                         | 5.31325E-08               | 627.263223            |
| 25     | 298.15 | 0.5          | 0.20812361 | 8.97531E-11                         | 5.69328E-08               | 634.327155            |
| 25     | 298.15 | 0.55         | 0.22111963 | 9.44752E-11                         | 6.04879E-08               | 640.251986            |
| 25     | 298.15 | 0.6          | 0.23330339 | 9.89021E-11                         | 6.38208E-08               | 645.292687            |
| 25     | 298.15 | 0.65         | 0.24474874 | 1.03061E-10                         | 6.69517E-08               | 649.633419            |
| 25     | 298.15 | 0.7          | 0.25552084 | 1.06975E-10                         | 6.98985E-08               | 653.410516            |
| 25     | 298.15 | 0.75         | 0.26567738 | 1.10665E-10                         | 7.26768E-08               | 656.727065            |
| 25     | 298.15 | 0.8          | 0.27526968 | 1.14151E-10                         | 7.53008E-08               | 659.66246             |
| 25     | 298.15 | 0.85         | 0.28434347 | 1.17447E-10                         | 7.7783E-08                | 662.278835            |
| 25     | 298.15 | 0.9          | 0.2929397  | 1.20571E-10                         | 8.01345E-08               | 664.625518            |
| 25     | 298.15 | 0.95         | 0.30109509 | 1.23534E-10                         | 8.23654E-08               | 666.742163            |
| 25     | 298.15 | 1            | 0.30884271 | 1.26349E-10                         | 8.44848E-08               | 668.661016            |
| 25     | 298.15 | 1.05         | 0.3162124  | 1.29027E-10                         | 8.65008E-08               | 670.408562            |
| 25     | 298.15 | 1.1          | 0.32323115 | 1.31577E-10                         | 8.84208E-08               | 672.006763            |
| 25     | 298.15 | 1.15         | 0.32992345 | 1.34009E-10                         | 9.02515E-08               | 673.473977            |
| 25     | 298.15 | 1.2          | 0.33631156 | 1.3633E-10                          | 9.1999E-08                | 674.825675            |
| 25     | 298.15 | 1.25         | 0.34241574 | 1.38548E-10                         | 9.36688E-08               | 676.074982            |
| 25     | 298.15 | 1.3          | 0.34825453 | 1.40669E-10                         | 9.5266E-08                | 677.233107            |
| 25     | 298.15 | 1.35         | 0.35384486 | 1.42701E-10                         | 9.67953E-08               | 678.309682            |
| 25     | 298.15 | 1.4          | 0.35920226 | 1.44647E-10                         | 9.82608E-08               | 679.313026            |
| 25     | 298.15 | 1.45         | 0.36434099 | 1.46514E-10                         | 9.96665E-08               | 680.250367            |
| 25     | 298.15 | 1.5          | 0.36927417 | 1.48307E-10                         | 1.01016E-07               | 681.12801             |
| 25     | 298.15 | 1.55         | 0.37401389 | 1.50029E-10                         | 1.02313E-07               | 681.951482            |
| 25     | 298.15 | 1.6          | 0.37857132 | 1.51685E-10                         | 1.03559E-07               | 682.725648            |
| 25     | 298.15 | 1.65         | 0.38295676 | 1.53279E-10                         | 1.04759E-07               | 683.454807            |
| 25     | 298.15 | 1.7          | 0.38717979 | 1.54813E-10                         | 1.05914E-07               | 684.142775            |
| 25     | 298.15 | 1.75         | 0.39124924 | 1.56292E-10                         | 1.07027E-07               | 684.792944            |
| 25     | 298.15 | 1.8          | 0.39517336 | 1.57717E-10                         | 1.08101E-07               | 685.408348            |
| 25     | 298.15 | 1.85         | 0.3989598  | 1.59093E-10                         | 1.09137E-07               | 685.991702            |
| 25     | 298.15 | 1.9          | 0.40261566 | 1.60422E-10                         | 1.10137E-07               | 686.545445            |
| 25     | 298.15 | 1.95         | 0.4061476  | 1.61705E-10                         | 1.11103E-07               | 687.071778            |
| 25     | 298.15 | 2            | 0.40956181 | 1.62945E-10                         | 1.12037E-07               | 687.572685            |

Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 4.** Valores correspondientes a la figura 10.

| T (°C) | T (K)  | X (kg/kg db) | k (W/mK)   | D <sub>AB</sub> (m <sup>2</sup> /s) | alpha (m <sup>2</sup> /s) | alpha/D <sub>AB</sub> |
|--------|--------|--------------|------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 10     | 283.15 | 0.01         | 0.00847386 | 4.06934E-12                         | 2.31805E-09               | 569.637619            |
| 10     | 283.15 | 0.05         | 0.03142724 | 7.37508E-12                         | 8.59701E-09               | 1165.68373            |
| 10     | 283.15 | 0.1          | 0.05777146 | 1.11692E-11                         | 1.58035E-08               | 1414.92601            |
| 10     | 283.15 | 0.15         | 0.08182487 | 1.46333E-11                         | 2.23834E-08               | 1529.61893            |
| 10     | 283.15 | 0.2          | 0.10387383 | 1.78088E-11                         | 2.8415E-08                | 1595.55662            |
| 10     | 283.15 | 0.25         | 0.12415888 | 2.07303E-11                         | 3.3964E-08                | 1638.37792            |
| 10     | 283.15 | 0.3          | 0.14288354 | 2.3427E-11                          | 3.90862E-08               | 1668.42598            |
| 10     | 283.15 | 0.35         | 0.16022119 | 2.5924E-11                          | 4.3829E-08                | 1690.67426            |
| 10     | 283.15 | 0.4          | 0.17632043 | 2.82426E-11                         | 4.8233E-08                | 1707.81084            |
| 10     | 283.15 | 0.45         | 0.19130938 | 3.04013E-11                         | 5.23332E-08               | 1721.41587            |
| 10     | 283.15 | 0.5          | 0.20529907 | 3.24161E-11                         | 5.61602E-08               | 1732.47905            |
| 10     | 283.15 | 0.55         | 0.21838619 | 3.43009E-11                         | 5.97402E-08               | 1741.65187            |
| 10     | 283.15 | 0.6          | 0.23065538 | 3.60679E-11                         | 6.30964E-08               | 1749.38071            |
| 10     | 283.15 | 0.65         | 0.24218097 | 3.77278E-11                         | 6.62493E-08               | 1755.98165            |
| 10     | 283.15 | 0.7          | 0.25302859 | 3.92901E-11                         | 6.92167E-08               | 1761.68479            |
| 10     | 283.15 | 0.75         | 0.26325634 | 4.07631E-11                         | 7.20145E-08               | 1766.66165            |
| 10     | 283.15 | 0.8          | 0.27291589 | 4.21542E-11                         | 7.46569E-08               | 1771.04264            |
| 10     | 283.15 | 0.85         | 0.2820533  | 4.34702E-11                         | 7.71565E-08               | 1774.92875            |
| 10     | 283.15 | 0.9          | 0.29070979 | 4.47169E-11                         | 7.95245E-08               | 1778.39933            |
| 10     | 283.15 | 0.95         | 0.29892236 | 4.58997E-11                         | 8.17711E-08               | 1781.51766            |
| 10     | 283.15 | 1            | 0.3067243  | 4.70233E-11                         | 8.39053E-08               | 1784.33477            |
| 10     | 283.15 | 1.05         | 0.31414566 | 4.80921E-11                         | 8.59355E-08               | 1786.8923             |
| 10     | 283.15 | 1.1          | 0.32121362 | 4.91101E-11                         | 8.78689E-08               | 1789.22455            |
| 10     | 283.15 | 1.15         | 0.32795284 | 5.00806E-11                         | 8.97125E-08               | 1791.36002            |
| 10     | 283.15 | 1.2          | 0.33438573 | 5.10071E-11                         | 9.14722E-08               | 1793.32261            |
| 10     | 283.15 | 1.25         | 0.34053271 | 5.18924E-11                         | 9.31537E-08               | 1795.1325             |
| 10     | 283.15 | 1.3          | 0.34641244 | 5.27392E-11                         | 9.47621E-08               | 1796.80684            |
| 10     | 283.15 | 1.35         | 0.35204196 | 5.35499E-11                         | 9.63021E-08               | 1798.36031            |
| 10     | 283.15 | 1.4          | 0.35743692 | 5.43269E-11                         | 9.77779E-08               | 1799.80554            |
| 10     | 283.15 | 1.45         | 0.36261167 | 5.50722E-11                         | 9.91935E-08               | 1801.15347            |
| 10     | 283.15 | 1.5          | 0.36757944 | 5.57877E-11                         | 1.00552E-07               | 1802.4136             |
| 10     | 283.15 | 1.55         | 0.37235239 | 5.64751E-11                         | 1.01858E-07               | 1803.59424            |
| 10     | 283.15 | 1.6          | 0.37694177 | 5.7136E-11                          | 1.03114E-07               | 1804.70267            |
| 10     | 283.15 | 1.65         | 0.38135796 | 5.7772E-11                          | 1.04322E-07               | 1805.74534            |
| 10     | 283.15 | 1.7          | 0.38561059 | 5.83845E-11                         | 1.05485E-07               | 1806.72792            |
| 10     | 283.15 | 1.75         | 0.38970858 | 5.89747E-11                         | 1.06606E-07               | 1807.65545            |
| 10     | 283.15 | 1.8          | 0.39366021 | 5.95438E-11                         | 1.07687E-07               | 1808.53245            |
| 10     | 283.15 | 1.85         | 0.39747319 | 6.00929E-11                         | 1.0873E-07                | 1809.36293            |
| 10     | 283.15 | 1.9          | 0.40115469 | 6.06232E-11                         | 1.09737E-07               | 1810.1505             |
| 10     | 283.15 | 1.95         | 0.40471139 | 6.11354E-11                         | 1.1071E-07                | 1810.89839            |
| 10     | 283.15 | 2            | 0.40814953 | 6.16305E-11                         | 1.1165E-07                | 1811.60954            |

Fuente: Elaboración propia.

**Anexo 5.** Valores correspondientes a la figura 11.

| T (°C) | T (K)  | X (kg/kg db) | k (W/mK)   | D <sub>AB</sub> (m <sup>2</sup> /s) | alpha (m <sup>2</sup> /s) | alpha/D <sub>AB</sub> |
|--------|--------|--------------|------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 125    | 398.15 | 0.01         | 0.78037517 | 3.98946E-08                         | 2.13474E-07               | 5.35095323            |
| 125    | 398.15 | 0.05         | 0.77392278 | 3.92083E-08                         | 2.11709E-07               | 5.39958646            |
| 125    | 398.15 | 0.1          | 0.7665172  | 3.84208E-08                         | 2.09683E-07               | 5.45754528            |
| 125    | 398.15 | 0.15         | 0.75975558 | 3.77017E-08                         | 2.07833E-07               | 5.51257902            |
| 125    | 398.15 | 0.2          | 0.75355743 | 3.70425E-08                         | 2.06138E-07               | 5.56490367            |
| 125    | 398.15 | 0.25         | 0.74785514 | 3.6436E-08                          | 2.04578E-07               | 5.61471445            |
| 125    | 398.15 | 0.3          | 0.74259148 | 3.58762E-08                         | 2.03138E-07               | 5.66218829            |
| 125    | 398.15 | 0.35         | 0.73771772 | 3.53579E-08                         | 2.01805E-07               | 5.70748588            |
| 125    | 398.15 | 0.4          | 0.73319209 | 3.48766E-08                         | 2.00567E-07               | 5.7507535             |
| 125    | 398.15 | 0.45         | 0.72897857 | 3.44285E-08                         | 1.99414E-07               | 5.79212462            |
| 125    | 398.15 | 0.5          | 0.72504595 | 3.40103E-08                         | 1.98338E-07               | 5.83172125            |
| 125    | 398.15 | 0.55         | 0.72136705 | 3.3619E-08                          | 1.97332E-07               | 5.86965518            |
| 125    | 398.15 | 0.6          | 0.71791808 | 3.32522E-08                         | 1.96389E-07               | 5.90602896            |
| 125    | 398.15 | 0.65         | 0.71467813 | 3.29077E-08                         | 1.95502E-07               | 5.94093691            |
| 125    | 398.15 | 0.7          | 0.71162878 | 3.25834E-08                         | 1.94668E-07               | 5.97446589            |
| 125    | 398.15 | 0.75         | 0.70875367 | 3.22776E-08                         | 1.93882E-07               | 6.00669603            |
| 125    | 398.15 | 0.8          | 0.70603829 | 3.19888E-08                         | 1.93139E-07               | 6.03770136            |
| 125    | 398.15 | 0.85         | 0.70346969 | 3.17156E-08                         | 1.92436E-07               | 6.0675504             |
| 125    | 398.15 | 0.9          | 0.70103627 | 3.14568E-08                         | 1.91771E-07               | 6.09630664            |
| 125    | 398.15 | 0.95         | 0.69872765 | 3.12113E-08                         | 1.91139E-07               | 6.12402903            |
| 125    | 398.15 | 1            | 0.69653446 | 3.09781E-08                         | 1.90539E-07               | 6.15077232            |
| 125    | 398.15 | 1.05         | 0.69444825 | 3.07562E-08                         | 1.89968E-07               | 6.1765875             |
| 125    | 398.15 | 1.1          | 0.69246139 | 3.05449E-08                         | 1.89425E-07               | 6.20152205            |
| 125    | 398.15 | 1.15         | 0.69056694 | 3.03434E-08                         | 1.88907E-07               | 6.22562027            |
| 125    | 398.15 | 1.2          | 0.6887586  | 3.01511E-08                         | 1.88412E-07               | 6.24892355            |
| 125    | 398.15 | 1.25         | 0.68703063 | 2.99673E-08                         | 1.87939E-07               | 6.27147058            |
| 125    | 398.15 | 1.3          | 0.68537779 | 2.97915E-08                         | 1.87487E-07               | 6.2932976             |
| 125    | 398.15 | 1.35         | 0.68379529 | 2.96232E-08                         | 1.87054E-07               | 6.31443854            |
| 125    | 398.15 | 1.4          | 0.68227872 | 2.9462E-08                          | 1.86639E-07               | 6.33492526            |
| 125    | 398.15 | 1.45         | 0.68082405 | 2.93073E-08                         | 1.86241E-07               | 6.35478766            |
| 125    | 398.15 | 1.5          | 0.67942757 | 2.91587E-08                         | 1.85859E-07               | 6.37405385            |
| 125    | 398.15 | 1.55         | 0.67808585 | 2.9016E-08                          | 1.85492E-07               | 6.39275028            |
| 125    | 398.15 | 1.6          | 0.67679574 | 2.88788E-08                         | 1.85139E-07               | 6.41090185            |
| 125    | 398.15 | 1.65         | 0.67555431 | 2.87468E-08                         | 1.848E-07                 | 6.42853204            |
| 125    | 398.15 | 1.7          | 0.67435886 | 2.86197E-08                         | 1.84473E-07               | 6.445663              |
| 125    | 398.15 | 1.75         | 0.67320688 | 2.84972E-08                         | 1.84158E-07               | 6.46231563            |
| 125    | 398.15 | 1.8          | 0.67209604 | 2.8379E-08                          | 1.83854E-07               | 6.47850969            |
| 125    | 398.15 | 1.85         | 0.67102418 | 2.8265E-08                          | 1.83561E-07               | 6.49426387            |
| 125    | 398.15 | 1.9          | 0.66998928 | 2.8155E-08                          | 1.83278E-07               | 6.50959585            |
| 125    | 398.15 | 1.95         | 0.66898946 | 2.80486E-08                         | 1.83004E-07               | 6.52452238            |
| 125    | 398.15 | 2            | 0.66802297 | 2.79459E-08                         | 1.8274E-07                | 6.53905933            |

Fuente: Elaboración propia.

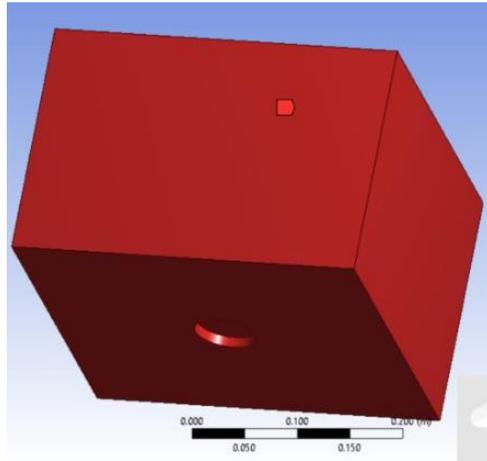
**Anexo 6.** Zonas límites del modelo de la simulación.

Figura 45 Zona cavidad de horno

Fuente: Elaboración propia

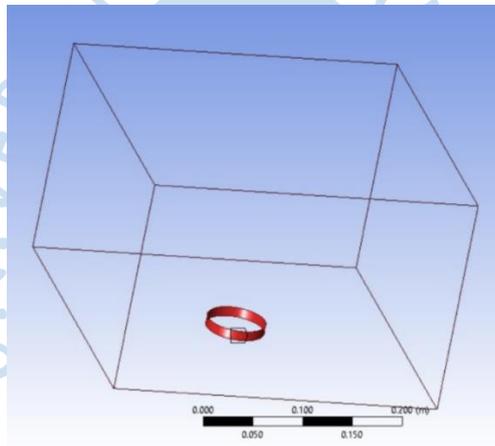


Figura 46 Zona de pared lateral de papa

Fuente: Elaboración propia

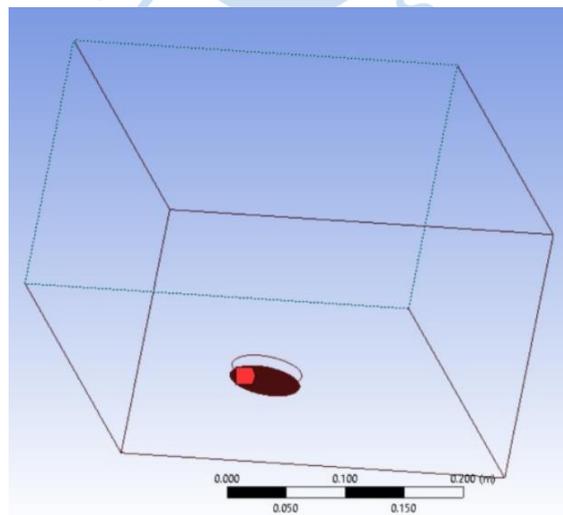


Figura 47 Zona pared inferior de papa

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 7. Protocolo de toma de muestras.

Para la realización de la toma de datos en el proceso de secado se recomienda proceder con los siguientes lineamientos:

### a) Preparación

Para adecuar la muestra que se utilizará para el proceso de secado, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se debe mantener una temperatura y una humedad constantes y uniformes en la muestra al inicio del proceso.
- La geometría que se considere debe ser regular, de manera que sea posible plantear un modelo relativamente sencillo para poder analizar los fenómenos de transferencia de calor y masa a partir de modelos comunes para geometrías conocidas como placa plana, cilindro y esfera. La muestra debe estar previamente preparada para el proceso (sin imperfecciones o impurezas): ya cortada en la geometría escogida y mantenida en un lugar fresco y seco.
- La cavidad del horno donde se realice el secado debe estar a condiciones constantes y específicas de temperatura, humedad y presión al inicio del proceso. Estos parámetros al igual que otras condiciones propias de este como su acondicionamiento, es decir, si cuenta con aislamiento térmico o con un sistema de recirculación de aire (como un ventilador) se incluyen dentro del análisis del modelo. Asimismo, este espacio debe estar acondicionado adecuadamente para colocar la muestra en su interior; y el funcionamiento del horno debe ser el adecuado y mantenerse constante a lo largo del proceso.
- Los instrumentos de medición deben estar previamente calibrados y debidamente aislados para evitar distorsiones y/o interferencias en la toma de datos de la muestra. Si hay contacto directo de alguno de los instrumentos con la muestra, esta sección de contacto debe mantenerse inocua y aislada (no debe interferir con el proceso de secado).

### b) Procesamiento

- Para acondicionar la cámara a determinadas condiciones de trabajo, en todos los experimentos se llevará el horno microondas a la temperatura de funcionamiento calentando 1 litro de agua destilada en un vaso de precipitado de vidrio durante cinco minutos.
- Retirar las rodajas de papa del lugar de almacenamiento e introducirlas al horno en el centro de la cavidad y en una posición tal que el eje de la muestra sea perpendicular a la superficie donde se está apoyando.
- El tiempo de permanencia de la muestra en el horno es dependiente de la potencia que esté utilizando el microondas y del contenido de humedad final de la muestra buscado. Se puede estimar y probar distintos tiempos de secado, e incluso pausas intermedias en estos tiempos, para tomar las medidas pertinentes de la muestra a lo largo del proceso con los instrumentos. Por ejemplo, se puede probar una potencia de 700 W con 3 intervalos de 1 minuto y pausas de 30 segundos entre ellos. Se deben hacer muchas pruebas variando la potencia y el tiempo con muestras iniciales idénticas para analizar el comportamiento del proceso. Al final de cada ensayo, se puede verificar si el proceso

fue el adecuado en tiempo y en potencia para lograr el contenido final de humedad a través de la medida del peso de la muestra.

- Terminado el tiempo propuesto, se retira la muestra del interior del horno y se coloca en un ambiente controlado para el post – procesamiento.

c) Post – procesamiento

- Realizar una primera inspección de la pieza procesada para determinar la eficiencia del proceso de secado evaluando parámetros cualitativos como olor, color, sabor, etc. Se sugiere detallar esto en una bitácora para tener un registro de dichos parámetros.
- Revisar la data generada obtenida en el procesamiento de la muestra recogida por el controlador y almacenada en el formato que el estudio requiera.
- Para comprobar que se cumplan los estándares de calidad, se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los estándares nacionales de calidad requeridos para la exportación del producto.

