



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE  
TUXTLA GUTIÉRREZ



NOMBRE DEL PROYECTO

*Diseño de un equipo para determinar el contenido de humedad de equilibrio del  
chile habanero*

DEPENDENCIA

*CENIDET*

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Departamento de Ingeniería Mecánica*

PRESENTADO POR

*Ramiro de Aquino García*

Estudiante de Ingeniería Mecánica del ITTG

*Ing. José Manuel Rasgado Bezares*

Asesor interno del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

*Dr. Efraín Sima Moo*

Asesor externo del CENIDET

# CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	III
NOMENCLATURA	IV
RESUMEN	V
<b>CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1-ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
<b>1.2 ESTADO DEL ARTE</b>	<b>3</b>
1.2.1 ESTUDIOS TEÓRICOS	4
1.2.2 ESTUDIOS EXPERIMENTALES	5
<b>1.3 OBJETIVO</b>	<b>9</b>
<b>1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2.- SECADO</b>	<b>10</b>
<b>2.1- PROCESO DE SECADO</b>	<b>10</b>
2.1.1-PARÁMETROS DEL PROCESO DE SECADO	12
2.1.2 ISOTERMAS DE SORCIÓN	13
2.1.3-MODELACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN	15
<b>2.2- ETAPAS EN LA OPERACIÓN DE SECADO</b>	<b>18</b>
2.2.1 PERÍODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE	18
2.2.2 PERÍODO DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE	19
<b>2.3 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA DEL AIRE</b>	<b>19</b>
2.3.1 SENSOR HIGROMÉTRICO ELÉCTRICO (SENSOR DE HUMEDAD)	19
2.3.2 TERMOPARES	20
<b>2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PROCESO DE SECADO</b>	<b>20</b>
2.4.1 TRANSFERENCIA DE CALOR	21
2.4.2 TRANSFERENCIA DE MASA	21
<b>2.5 MODELO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PROCESO DE SECADO</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 3.- DISEÑO DEL EQUIPO</b>	<b>24</b>
<b>3.1- CONSIDERACIONES DE DISEÑO</b>	<b>24</b>
<b>3.2- DISEÑO DEL EQUIPO EN EL SOFTWARE SOLIDWORKS</b>	<b>26</b>

3.2.1- VISTAS DEL EQUIPO EN 2D Y 3D	26
3.2.2- VISTAS DEL EQUIPO SÓLIDO	28
<b>CAPÍTULO 4.- SIMULACIÓN DEL EQUIPO</b>	<b>31</b>
<b>4.1- FUNDAMENTOS DE FLUENT</b>	<b>31</b>
4.1.1- MODELOS DE FLUENT	32
4.1.2- PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA EN FLUENT	33
4.1.3- ESQUEMAS NUMÉRICOS DE FLUENT	34
<b>4.2- GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA</b>	<b>35</b>
4.2.1- EQUIPO DISEÑADO EN FLUENT	35
<b>4.3- SIMULACIÓN EN FLUENT</b>	<b>37</b>
<b>4.4- RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FLUENT</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO 5.- CONCLUSIÓN</b>	<b>43</b>
<b>5.1- CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>44</b>

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- ESQUEMA DE UNA CARTA PSICOMÉTRICA	11
FIGURA 2- UNA TÍPICA ISOTERMA DE SORCIÓN MOSTRANDO EL FENÓMENO DE HISTÉRESIS (BASU ET AL. 2006)	17
FIGURA 3- CONFIGURACIÓN DE LOS DUCTOS DENTRO DEL SISTEMA.	25
FIGURA 4- DIMENSIONES DE LOS DUCTOS INTERIORES	26
FIGURA 5- DIMENSIONES DEL DUCTO MAYOR	27
FIGURA 6- DIMENSIÓN DE LA FUENTE DE CALOR	27
FIGURA 7- VISTA ISOMÉTRICA DEL EQUIPO (SOLIDWORKS)	28
FIGURA 8- VISTA DEL EQUIPO EN SOLIDO	29
FIGURA 9- VISTA DEL EQUIPO TERMINADO EN SOLIDWORKS	30
FIGURA 10- VISTA DE SECCIÓN	30
FIGURA 11- VISTA ISOMÉTRICA DEL EQUIPO	35
FIGURA 12- MALLADO DEL EQUIPO POR MULTIZONAS	36
FIGURA 13- VISTA DE SECCIÓN DEL MALLADO	36
FIGURA 14- VISTA ISOMÉTRICA DEL EQUIPO EN EL PROCESO DE LA SIMULACIÓN	38
FIGURA 15- GRAFICA DE COMPARACIÓN ENERGÍA-ITERACIONES	39
FIGURA 16- VISTA FRONTAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LA CAVIDAD	39
FIGURA 17- VISTA DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN LA PARTE INFERIOR DEL EQUIPO	40
FIGURA 18- CONTORNOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN UNA VISTA ISOMÉTRICA	40
FIGURA 19- DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL EQUIPO (LLENADO)	41
FIGURA 20- DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE E INTERIOR DEL EQUIPO	41

# NOMENCLATURA

## Latinas

$a_w$	Actividad de agua, (%)
A	Área normal, m <sup>2</sup>
A, B, C	Coefficientes del modelo
$C_p$	Calor específico, J/kg-K
$D_{eff}$	Difusividad efectiva, cm <sup>2</sup> /s
h	Entalpia del aire, J/kg
$k_c$	Conductividad térmica del aire, W/m K
k	Conductividad térmica, W/m K
Me	Contenido de humedad de equilibrio, (%)
$\dot{m}_{dif}$	Razón de difusión de masa, kg/s
$P_w$	Presión de vapor de agua en el producto, Pa
$P_w^o$	Presión vapor de agua pura, Pa
RH	Humedad relativa del aire, (%)
R	Constante de gas universal, J/kg-K
T	Temperatura absoluta, K
$T_\beta$	Temperatura del producto, K
$T_\gamma$	Temperatura del aire, K
$X_\beta$	Humedad inicial del producto, (%)

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de un equipo para determinar el contenido de humedad de equilibrio del chile habanero. El equipo consta de 7 ductos, una fuente de calor y la cavidad en la que estarán. Los ductos donde estará el producto (chile habanero) tiene un diámetro de 76.2 mm con un espesor de 1.6 mm, la fuente de calor se consideró como una placa con un diámetro de 200 mm y un espesor de 1 mm y la cavidad con un diámetro de 254 mm y espesor de pared igual que los ductos. Los ductos tienen una longitud de 150 mm y la cavidad de 260 mm.

Se presentan las ecuaciones que gobiernan al proceso de secado, estas ecuaciones serán muy útiles ya que se encuentran en función al contenido de humedad de equilibrio de un producto, solo basta con determinar la humedad y temperatura del aire y parámetros del estudio del producto.

Con respecto a la simulación se describe brevemente como es que el software FLUENT trabaja para poder obtener los resultados, cuales son las ecuaciones que resuelve para cada volumen de control. Y el tipo de mallado que se utilizó para la solución.

Las condiciones de frontera para la simulación fueron: el flujo de calor es cero en la superficie externa del equipo, un flujo de calor de  $600 \text{ W/m}^2$  que genera la fuente de calor. Las condiciones iniciales fueron: velocidad del aire en el interior de la cavidad de  $v=0.1 \text{ m/s}$  y una temperatura de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , con base a esto se obtuvieron los resultados que se tomaron para determinar si la configuración de los ductos y la fuente de calor son los adecuados.

De los resultados obtenidos se llega a la conclusión que la distribución de temperatura en el interior del equipo es uniforme y se necesita proporcionar un flujo de calor de  $600 \text{ W/m}^2$  para alcanzar una temperatura máxima de  $96 \text{ }^\circ\text{C}$  en el interior de la cavidad.

## CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una reseña del problema a resolver en este trabajo. Primero se menciona como, cuando y porque surgió la necesidad de secar los granos. Después se describe en que consiste el proceso de secado, los beneficios que trae consigo el realizar este proceso y se hará mención de los parámetros que intervienen en el proceso. Por otra parte, se presentan investigaciones previas que se han llevado a cabo para determinar la humedad de equilibrio de algunas frutas y verduras que se encuentran disponibles en la literatura. Así como la mención de los objetivos de este trabajo, los alcances, metas y la estructura del trabajo.

### 1.1-ANTECEDENTES

La estabilidad en general, y por lo tanto la vida útil de un producto alimenticio, está regulada por la interacción del agua con el resto de los componentes de los alimentos. Por esta razón, el conocimiento de las características de adsorción es esencial para diversas ramas de la tecnología de los alimentos. Las isotermas de adsorción para un producto, es decir, el gráfico donde el contenido de humedad se representa gráficamente como una función de la actividad de agua ( $a_w$ ) a una temperatura constante, describe el estado termodinámico del agua.

El secado de las frutas, en común con los cereales y oleaginosas, están sujetos al deterioro por microorganismos, insectos y ácaros, así también sus cambios físicos y químicos durante el almacenamiento. El secado es una de las técnicas más antiguamente utilizadas para la conservación de alimentos desde los principios de la humanidad ya que proporciona al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia (Fito *et al.*, 2001).

El presente trabajo describe el método para determinar el contenido de humedad de equilibrio (EMC) del chile habanero. Mediante un equipo térmico que constará en la colocación de unos sensores en la parte interna de una cavidad que midan la humedad relativa del aire y su temperatura por medio de

ese valor obtenido y con las ecuaciones que relacionan al EMC/ERH se podrá saber el contenido de humedad del producto.

Se ha encontrado en la literatura dos métodos de poder determinar la EMC los cuales son:

1. Gravimétrico estático.
2. Higrométrico.

El primero método se toma en cuenta el cambio en el peso de las muestras al transcurrir el tiempo, las muestras son contenidas en recipientes herméticamente cerrados, y en ellos se vierten soluciones saturadas de distintas sales a diferentes temperaturas controladas. Las muestras se pesan hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio con un cambio de peso mínimo. Al final son medidas por medio gravimétrico secando en un horno para determinar la masa sólida en la muestra, se han encontrado que este método es muy aplicado a muchos alimentos como por ejemplo: mangos, almendra y algunos tipos de chiles como padrón y pimientos verdes (Hui *et al.*, 2008).

El segundo método está basado en medir la humedad relativa del aire en equilibrio con la muestra en un envase usando un higrómetro.

El primer método cuenta con algunos inconvenientes, pero el principal es cuando se realiza la medición del peso de la muestra ya que se debe sacar del secador y al realizar esto la muestra vuelve a ganar cierta humedad con el aire circundante y probablemente la medición que les dé tendrá un margen de error mayor al que se espera. Por tal motivo se realiza el diseño del secador basándonos en el segundo método para la determinación del EMC.

El principal problema que se presenta para el diseño del equipo, es la distribución de temperatura en el interior del equipo. Una forma de determinar esto sería realizar pruebas experimentales para esta condición de operación. Pero el realizar estas pruebas generaría gastos en la construcción de los prototipos y las pruebas experimentales. Sin embargo simular la distribución de la temperatura en un software sería más rápido y económico. Para la simulación se utilizara la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD),



mediante esta simulación puede dar una mejor idea de las geometrías adecuadas para el secador.

La Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) tiene como objetivo la simulación del flujo de fluidos y los procesos de transferencia de calor. Se basa en la utilización de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momentum y la energía en el seno del fluido. Hoy en día, con las enormes posibilidades de los ordenadores y los desarrollos de los métodos numéricos, la CFD se está convirtiendo en una herramienta muy práctica y eficiente para el análisis de situaciones en las que estén involucradas fluidos y por consiguiente, es una inestimable herramienta de análisis y diseño.

A continuación se presentan estudios que se han realizado con respecto a la determinación del contenido de humedad de equilibrio (EMC) de las muestras, diseños y construcciones de equipos para determinar el contenido de humedad de varios productos.

## **1.2 ESTADO DEL ARTE**

En este apartado se clasifican dos tipos de estudios: estudios teóricos y estudios experimentales. Los estudios teóricos consisten en todo lo relacionado con equipos que son utilizados para determinar las humedades de equilibrio como son: las ecuaciones que rigen el proceso de secado, los parámetros que intervienen y la simulación de estas mismas. En cuanto para los estudios experimentales se encuentran el diseño del equipo y construcción del mismo.

### 1.2.1 ESTUDIOS TEÓRICOS

Dentro de los estudios teóricos se encuentran varios trabajos realizados que explican el proceso de secado, así también como determinar el contenido de humedad de algunas muestras utilizando correlaciones empíricas.

J. Stencl *et al.*, (1999), realizó las comparaciones de los modelos del contenido de humedad de equilibrio de las ciruelas pasas en un rango de temperatura de 15-45°C. Fue desarrollado en un laboratorio computarizado de secado con un software de control especial. El cual consiste en dos partes principales: un ducto de aire con un controlador de temperatura, de su velocidad y HR. Y una balanza eléctrica. Para determinar la humedad de equilibrio, las isothermas de adsorción y desorción de agua lo realizaron en un rango de temperatura de 15-45°C en 5 pasos y una RH de entre 40-100% en 10 pasos. Una vez obtenido sus valores determinaron la ecuación para este modelo la cual fue de Halsey modificado.

J.P. Sitompul *et al.*, (2000), realizaron un estudio en la estimación de parámetros no-lineal de EMC/ERH y las correlaciones para los productos en granos. Consistió en una predicción matemática de la isoterma de adsorción del maíz la cual fue desarrollada para tres correlaciones del EMC como Henderson modificado, Chung-Pfost modificado, Oswin modificado y Halsey modificado. Posteriormente determinaron los datos experimentales de sorción de humedad utilizando un método gravimétrico dinámico a temperatura de 30 y 40 °C y un rango de actividad de agua de 0.07 a 0.75. Utilizaron algoritmos de regresión no-lineal, para ajustar los datos medidos a las relaciones de EMC. Comparando los datos obtenidos entre las ecuaciones propuestas, concluyeron que las ecuaciones Henderson modificada y Oswin modificado dan el mejor modelo para la predicción de la adsorción y desorción de EMC del grano de maíz para determinado rango de temperatura y actividad de agua.

S. Basu *et al.*, (2006), realizaron una revisión de los modelos para las isothermas de sorción para los alimentos. Presentan conceptos básicos relacionados con la termodinámica de adsorción de agua y la medición de la isoterma de sorción para materiales alimenticios. Proporcionaron útiles informaciones a los investigadores que siguen el trabajo sobre la adsorción de

materiales de alimentos, así como el modelado de procesos de secado. Proponen los modelos matemáticos para describir las isothermas de sorción y recomiendan el modelo de GAB para determinar los datos de sorción.

Da-Wen-Sun (), realizó una comparación y selección de EMC/ERH, ecuaciones de secado y almacenamiento de granos y oleaginosas. Su trabajo consistió en que a partir de un gran número de publicaciones que contienen datos de EMC/ERH para estos granos y semillas oleaginosas, extrajeron los datos experimentales para formar sub-conjuntos adecuados para la evaluación de las ecuaciones de isothermas. Existen más de 200 ecuaciones de EMC/ERH que se encuentran disponibles, sin embargo hay una única ecuación que tiene la capacidad de describir con precisión las relaciones EMC/ERH para varios granos en un amplio rango de humedad relativa y la temperatura (Van den Berg y Bruin, 1981; Sun y Woods, 1993). Los resultados fueron obtenidos después de comparar las ecuaciones que consideraron más relevantes para este trabajo y concluyeron que las ecuaciones más apropiadas para describir las isothermas de adsorción de EMC/ERH son: la ecuación de Chung-Pfost modificado, Oswin modificado, Strohman-Yoerger y Halsey modificado.

### **1.2.2 ESTUDIOS EXPERIMENTALES**

Lo correspondiente a los estudios experimentales se encontró que se han realizado pruebas en secadores ya construidos para la obtención de la cinética de secado y las ecuaciones satisfactorias para el modelo.

S. W. Pixton y Sylvia Warburton (1973), determinaron el contenido de humedad y humedad relativa de equilibrio del secado de frutas (Sultanas). Utilizaron un horno de vacío para la determinación del contenido de humedad de las sultanas, secándolo hasta un peso constante a una temperatura de 70 °C y una presión de 5 mm Hg durante 24 horas. Observaron en los resultados que las curvas tanto de desorción como adsorción, eran idénticas a todas las temperaturas experimentales en el rango de 5-35 °C.

C. T. Kiranoudis *et al.*, (1993), determinaron el contenido de humedad de equilibrio y desorción térmica de algunas legumbres a diferentes actividades de

agua y diferentes temperaturas, utilizando la ecuación de GAB y el método analítico de regresión no-lineal. En este trabajo utilizaron el método gravimétrico estático para determinar el contenido de humedad de equilibrio, cortando en rodajas de 1 a 2 mm las legumbres utilizadas. Realizaron el secado de estas muestras en horno de vacío a 70 °C y 50 Torr por 6 hrs. Los resultados obtenidos fueron comparados con datos encontrados en la literatura los cuales fueron satisfactorios. Debido al comportamiento de las isothermas concluyeron que el método gravimétrico estático es el más útil para determinar el EMC en las legumbres y la ecuación de GAB es la mejor para obtener resultados satisfactorios.

L. Ait Mohamed *et al.*, (2005), determinaron el contenido de humedad de equilibrio y el calor de sorción del *Gelidium Sesquipedale*. Determinaron la humedad de equilibrio para la adsorción y desorción de agua del *Gelidium Sesquipedale* en un intervalo de temperaturas comprendidas entre 30 y 50 °C y actividades de aguas entre 0.05 y 0.9, utilizando el método gravimétrico estático. Los datos experimentales obtenidos fueron descritos por seis modelos. Los modelos GAB y BET modificado fueron los más adecuados para describir las curvas de sorción. Los calores isostérico de desorción y adsorción de agua se determinaron a partir de los datos de equilibrio a distintas temperaturas.

D.S. Cordeiro *et al.*, (2006), realizaron un estudio para determinar el modelo del contenido de humedad de equilibrio para las hojas *Maytenus ilicifolia*. Comenzaron midiendo el contenido de humedad de equilibrio para las hojas *M. ilicifolia* utilizando el método gravimétrico estático, a humedades relativas y temperaturas que van desde 11 a 85% y del 30 al 60 °C, respectivamente. Los datos que obtuvieron fueron comparados con cinco modelos disponibles en la literatura (Chung-Pfost, Halsey modificado, Oswin modificado, Henderson-Thompson y Guggenheim-Anderson-deBoer). Observaron que los datos de adsorción fueron mejores descritos por la ecuación Chung-Pfost, mientras que los datos de desorción fueron descritos mejor por la ecuación de Henderson-Thompson. Llegaron a la conclusión que estos modelos se pueden utilizar para la estimación del contenido de humedad de equilibrio de las hojas *M. ilicifolia*.

García *et al.*, (2007), realizaron el estudio para poder desarrollar o adaptar un sistema de secado para la obtención de hortalizas y plantas aromáticas deshidratadas. Determinaron las isothermas de adsorción y la cinética de secado de las hortalizas. Las isothermas de adsorción se determinaron utilizando el método gravimétrico estático, para determinar la cinética de secado, se utilizó una capa delgada de material que fue secada en un secadero de flujo transversal a 60 °C. Los valores experimentales de las isothermas de adsorción se ajustaron al modelo de GAB. Los datos de la cinética de secado se ajustaron a 10 modelos matemáticos. El modelo denominado “una aproximación a la difusión” fue el que presento mejor ajuste para este estudio. A través de las cinéticas de secado pudieron determinar los tiempos de secado para alcanzar estos contenidos de humedad.

A. Arabhosseini *et al.*, (2010), realizaron un modelado del contenido de humedad de equilibrio (EMC) del *Miscanthus*. Las isothermas de desorción del *Miscanthus* (tallos y hojas) fueron determinadas por separado mediante el método de soluciones de sal saturada a tres temperaturas (20, 50 y 70 °C) dentro de un rango de humedad relativa de 5 a 90%. Para la determinación de las curvas experimentales de isothermas de desorción se ajustaron a cuatro modelos (Henderson Modificado, Halsey Modificado, Oswin Modificado y los modelos Chung-Pfost Modificado). Al final se concluyó que el modelo de Oswin Modificado era el más adecuado para describir la correlación entre el contenido de humedad de equilibrio, la humedad relativa y la temperatura.

A. Zomorodian *et al.*, (2011), determinaron las isothermas del EMC y los modelos matemáticos apropiados para la canola aplicando el método gravimétrico. Consistió en determinar el contenido de humedad de equilibrio para las semillas de canola a diferentes humedades relativas del aire y diferentes temperaturas, para poder modelar las curvas de isothermas. Realizando las pruebas en una cámara ambiental de madera con dimensiones de (100X60X60) cm. Ocupando tres temperaturas diferentes, siete humedades relativas y midiendo el peso con una balanza eléctrica. Los resultados fueron validados al comparar el comportamiento de las isothermas de acuerdo con la clasificación de Brunauer.

O.M. Jensen (2012), realizó un método para la determinación con una alta precisión de la humedad relativa de equilibrio. Se consideró como un nuevo método para medir la humedad relativa de equilibrio y la temperatura de equilibrio en el punto de rocío de una muestra de material. El método también se puede utilizar para medir la humedad relativa del aire. La construcción consta de una sección transversal esquemática del punto de rocío del medidor. La cámara de medición contiene la muestra a ensayar. La parte del lado inferior de la unidad del sensor está equipado con dos termopares tipo T, marcados T1 y T2. Los termopares se componen de alambres de 0.2 mm de diámetro soldadas al punto del sensor. Dos tapas se colocan en la parte superior de las superficies del sensor. Concluyeron que ERH es muy preciso. Y que es posible a través de medición de la temperatura diferencial con sencillos termopares y reduciendo al mínimo la interacción de humedad con el material de muestra.

S. M. Demarchi *et al.*, (2013), determinaron las características de adsorción del escaramujo, manzana y pulpa de tomate determinado por los métodos gravimétrico e higrométrico. Determinaron las isothermas de desorción a los 20 y 40 °C, para ambos métodos. La ecuación de GAB y el modelo de Halsey se ajustaron a los datos gravimétricos. Observaron que el método higrométrico no es adecuado para medir la actividad de agua de tales muestras.

De la revisión bibliográfica se encontró que para la determinación del contenido de humedad de equilibrio de una muestra, se recomienda utilizar el método gravimétrico estático y utilizar las ecuaciones empíricas de GAB, ya que dan un comportamiento de las curvas de isothermas más exacto. En cuanto a la geometría de la sección transversal de los secadores se encontró un tipo: rectangular. Por otra parte el secador más utilizado para determinar EMC es el horno de vacío. Así también se encontró los parámetros que se deben considerar en el proceso de secado los cuales son: la temperatura, humedad relativa del aire y el contenido de humedad inicial del producto.

En este trabajo, se pretende diseñar un secador utilizando el método higrométrico. En donde para obtener la geometría del equipo se realizara una simulación en un software para visualizar la distribución de temperatura dentro de la cavidad.

### 1.3 OBJETIVO

Diseñar un equipo para determinar la humedad de equilibrio del chile habanero, con base en la simulación térmica en el interior de una cavidad que contiene una fuente de calor, utilizando el software comercial FLUENT.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Familiarizarse con los modelos cinéticos para determinar el contenido de humedad de equilibrio del chile habanero para el diseño del equipo.
2. Identificar los parámetros para la determinar la humedad de equilibrio del chile habanero, como lo son, temperatura y humedad del aire, temperatura y humedad inicial del producto.
3. Simular el flujo de calor en el interior de la cavidad y observar el comportamiento de la distribución de temperatura, con el software FLUENT.
4. Identificar los elementos de la geometría del equipo que presentan temperaturas excesivas.
5. Encontrar las dimensiones del equipo para determinar el contenido de humedad de equilibrio del chile habanero.

## **CAPÍTULO 2.- SECADO**

En este capítulo se hará mención él porque es de gran importancia realizar el proceso de secado en productos con un alto contenido de humedad. Además se hace mención sobre los parámetros que se consideran para el proceso de secado con sus respectivas descripciones y las ecuaciones que son utilizadas en el proceso. Por otro lado se describen las etapas en la operación del secado, los mecanismos de transferencia de calor y materia en el secado.

### **2.1- PROCESO DE SECADO**

El secado es una de las técnicas más antiguamente utilizadas para la conservación de alimentos desde los principios de la humanidad ya que proporciona al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencias (Fito *et al.*, 2001). El secado se define como la remoción de humedad debido a la transferencia simultanea de calor y masa (Heldman *et al.*, 1992). Consiste en separar pequeñas cantidades de agua hasta que esta llegue a un valor aceptable bajo, es una de las etapas finales de una serie de operaciones (McCabe, 2002).

En el contenido total de agua en un alimento, no todas las moléculas se encuentran interaccionando con la misma intensidad con el sólido, una parte es fuertemente retenida, en el proceso de secado el agua se encuentra contenida de dos maneras: agua libre y ligada (Kuprianoff, 1958). El agua libre o absorbida, que es la forma predominante, se libera con gran facilidad y es estimada en la mayor parte de los métodos usados para el cálculo del contenido de agua. El agua ligada se halla combinada o adsorbida. La cantidad y manera en la que es removida el agua cambia la estructura y depende de la unión que tenga, así también determinan las características de reconstitución.

Durante el secado primeramente es removida el agua libre, esta no cambia las propiedades del sólido durante el secado y después es removida el agua ligada aunque remover uniones más fuertes requiere la utilización de grandes cantidades de energía (Ginzburg, 1969).



En los alimentos al reducir el contenido de humedad se proviene el crecimiento de microorganismos y se minimizan las demás reacciones de deterioro (Doymaz y Pala, 2003). Por otra parte se reduce su volumen y su peso, lo cual reduce el costo de empaque y transporte, además el almacenamiento puede ser a temperatura ambiente por largos periodos de tiempo (Jarayaman y Das Gupta, 1995).

Para el proceso de secado industrial y poder determinar los parámetros requeridos de secado utilizan la carta psicrométrica. La carta psicrométrica proporciona las propiedades termodinámicas del aire a la presión de 1 atmósfera: 1).- Temperatura de bulbo seco, 2).- Temperatura de bulbo húmedo, 3).- Humedad relativa, 4).- Temperatura de saturación, 5).- Volumen específico, 6).- Entalpía y 7).- Humedad específica. Para poder trabajar con la carta psicrométrica se necesita conocer 2 parámetros de los 7 antes mencionados, y a través de estos se determinan los parámetros faltantes.

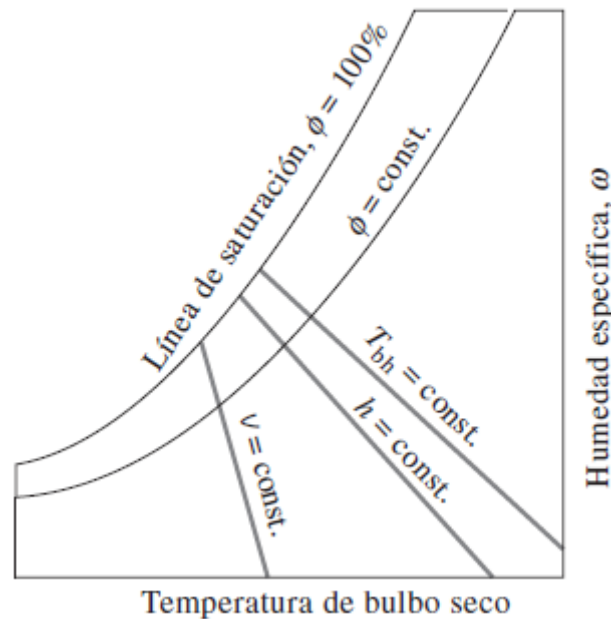


FIGURA 1- Esquema de una carta psicrométrica

### 2.1.1-PARÁMETROS DEL PROCESO DE SECADO

Las consideraciones fundamentales que intervienen en el proceso de secado son las siguientes:

Contenido de humedad: Expresa la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco.

Humedad relativa del aire: Es la cantidad de humedad que el aire contiene respecto a la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a la misma temperatura. Se utiliza para indicar la cantidad de humedad (%) presente en una mezcla de aire, vapor de agua y agua saturada. El tiempo de secado es directamente proporcional a la humedad relativa del aire de secado. A menor humedad relativa mayor es la capacidad de absorber humedad de la muestra.

Temperatura del aire de secado: Este parámetro varía según el tipo de muestra que se vaya a secar. La temperatura del aire de secado desempeña un papel muy importante durante el proceso de secado ya que una excesiva temperatura de secado puede causar que el grano se vuelva quebradizo y pierda sus propiedades nutricionales.

El contenido de humedad inicial de la muestra: Es la humedad que tiene la muestra antes de realizar el proceso de secado.

El contenido de humedad final de la muestra: Es la humedad que tiene la muestra después de secarlo. La humedad final depende del tiempo que se desea almacenar el producto, así como la calidad que se desea obtener del producto.

Otros parámetros que se presentan en una muestra durante el proceso de secado son: La humedad de equilibrio y la humedad crítica.

Humedad de equilibrio: Cuando se seca un producto, este primeramente cambia de estado sus moléculas, pasando de un estado líquido a vapor de agua, formando una mezcla entre este y el aire. Al mismo tiempo ocurre una adsorción del vapor de agua en la superficie de la muestra humedeciéndolo. Llegado un tiempo, el número de moléculas que cambian a estado gaseoso es

el mismo que se absorbe en la superficie de la muestra alcanzando un equilibrio entre este y el aire que lo rodea (Ginzburg, 1969).

La humedad en este momento de equilibrio recibe el nombre de contenido de humedad en el equilibrio, y es dependiente tanto de la temperatura, así como también de la variación del contenido de humedad del producto (Okos *et al.*, 1992).

Humedad crítica: Es la humedad que tiene un producto cuando la resistencia interna al transporte de humedad es igual a la resistencia externa a la remoción de vapor de agua de la superficie del producto; depende de las condiciones de secado y de las características del sólido tales como el tamaño y su forma. De una forma más sencilla, es la humedad que tiene el producto cuando termina el período de velocidad de secado constante y empieza el período de velocidad de secado decreciente.

### **2.1.2 ISOTERMAS DE SORCIÓN**

El efecto de todo proceso donde se encuentre involucradas moléculas de agua combinadas reversiblemente con los alimentos sólidos se le llaman isotermas de sorción (Lewicky, 1998), y describen la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio de cierto producto a temperatura y presión específicas.

La actividad de agua es importante para demostrar la estabilidad que tienen los productos deshidratados en el aspecto físico, químico y microbiológico. Por lo tanto una definición más precisa para la actividad de agua es la siguiente: la actividad de agua está dada a una temperatura, para la cual existe una relación de presiones entre la presión parcial de vapor del agua en el sistema y la presión parcial de vapor del agua pura a la misma temperatura.

Está definida por:

$$a_w = \left( \frac{P_w}{P_w^o} \right)_T \text{-----} > 2.1$$

Dónde:

$P_w$  = presión vapor de agua en el producto

$P_w^o$  = presión vapor de agua pura

La actividad de agua es un parámetro bien establecido para controlar el crecimiento de microorganismos en las comidas (Chirife y Buera 1995, 1996). Pero la  $a_w$  es el factor único para controlar el crecimiento; existen otros factores severos, tales como el pH y la temperatura. Para la mayoría de los alimentos el rango de actividad de agua se encuentra dentro 0.6-0.86 para controlar el crecimiento de microorganismos (Chirife y Buera 1996).

El contenido de humedad de equilibrio depende de la dirección en que éste vaya, ya sea que un sólido húmedo se seque por desorción o que en un sólido seco se lleve a cabo el fenómeno de adsorción. El método utilizado para ver el comportamiento de los fenómenos de desorción y adsorción se utilizan las isotermas de sorción.

Las isotermas de sorción comprenden adsorción física, condensación capilar y formación de líquidos y solución de sólidos. Existen tres métodos diferentes para determinarlas los cuales son los siguientes:

1. Gravimétrico estático y dinámico.
2. Manométrica
3. Higrométrico

Las isotermas de sorción se presentan de manera gráfica o en ecuación. La diferencia entre la adsorción y desorción se llama histéresis. La forma de la histéresis depende de algunos factores como lo son: composición del producto, temperatura, almacenamiento previo al análisis, pre tratamientos, etc.

El proceso de sorción está regulada por dos mecanismos: el primero es la cinética de Langmuir donde las moléculas son adsorbidas directamente en

lugares selectos de la superficie a una temperatura establecida. En el segundo mecanismo la superficie es cubierta por una capa de gas de una molécula de espesor y otra de condensación en capas subsecuentes (Van den Berg, 1985).

### 2.1.3-MODELACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN

Se han encontrado en la literatura ecuaciones para modelar las isotermas, algunas son variaciones del mismo modelo y son clasificadas en 4 grupos. Modelos cinéticos basados en una monocapa, modelos cinéticos basados en sorción multicapas y en una película de condensación, modelos importados por la literatura y modelos empíricos (Peleg, 1993). En la siguiente tabla se muestran los modelos más utilizados para determinar el contenido de humedad de equilibrio de algún producto de interés.

Model name	Equation
1. Caurie	$Me = \exp(\ln(A) - B \times RH)$
2. Chung-Pfost	$Me = A + B \ln(-\ln(RH))$
3. GAB	$Me = \frac{ABC(RH)}{(1-C(RH))(1-C(RH)+BC(RH))^{1/B}}$
4. Halsey	$Me = \left( -\frac{A}{\ln(RH)} \right)^{1/B}$
5. Henderson	$Me = \left( -\frac{\ln(1-RH)}{A} \right)^{1/B}$
6. Kuhn	$Me = \frac{A}{\ln(RH)} + B$
7. Oswin	$Me = A \left( \frac{RH}{1-RH} \right)^B$
8. Modified BET	$Me = \frac{(a+bT)(c)(RH)}{(1-RH)(1-RH+c \times RH)}$
9. Modified Chung-Pfost	$Me = -\ln \left[ -\frac{(T-c)(\ln(RH))}{a} \right] \left( \frac{100}{b} \right)$
10. Modified Halsey	$Me = \left[ -\frac{\exp(a+bT)}{\ln(RH)} \right]^{1/c}$
11. Modified Henderson	$Me = \left[ -\frac{\ln(1-RH)}{a(T+c)} \right]^{1/b}$
12. Modified Oswin	$Me = (a + bT) \left( \frac{RH}{1-RH} \right)^c$
13. Modified Smith	$Me = (a + bT) - (c + dT) \ln(1 - RH)$

TABLA 1- Modelos utilizados para datos experimentales de adsorción (Zomorodian et al. 2011)

El modelo desarrollado por Guggenheim, Anderson y De Boer es conocido como el modelo de GAB. Basado en la versión del modelo de BET para la sorción de multicapa (Van der Berg y Bruin 1981). Es reconocido como el más versátil y ampliamente utilizado con resultados satisfactorios para un

gran número de productos alimentarios, como lo son las pasas, manzanas, productos cárnicos, algunas variedades de chiles, entre otras (Chenlo *et al.*, 2005). La ecuación es razonable para un número pequeño de parámetros (tres), la ecuación de GAB se encuentra adecuada para datos experimentales en la actividad de agua ( $a_w$ ) en el rango de 0 a 95 para muchos alimentos de interés práctico. Esta ecuación fue recomendada por el Grupo de Proyecto Europeo COST 90 en propiedades físicas de los alimentos (The European Project Group COST 90 on Physical Properties of Food) (Wolf *et al.*, 1985).

El modelo de GAB está definido de la siguiente manera:

$$Me = \frac{ABC(RH)}{(1-C(RH))(1-C(RH)+BC(RH))} \text{-----} > 2.2$$

Dónde:

- $Me$ : Es el contenido de humedad de equilibrio.
- $RH$ : Es la humedad relativa del aire.
- $A, B, C$ : Son coeficientes del modelo.

Los parámetros B y C en la ecuación de GAB se pueden relacionar con la temperatura usando las siguientes ecuaciones (Labuza *et al.*, 1985):

$$B = B_o \exp\left(\frac{h_1}{RT}\right) \text{-----} 2.3$$

$$C = C_o \exp\left(\frac{h_2}{RT}\right) \text{-----} 2.4$$

Dónde  $B_o, C_o, h_1$  y  $h_2$  son coeficientes,  $T$  es la temperatura absoluta y  $R$  es la constante de gas universal.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de adsorción y desorción de isotermas.

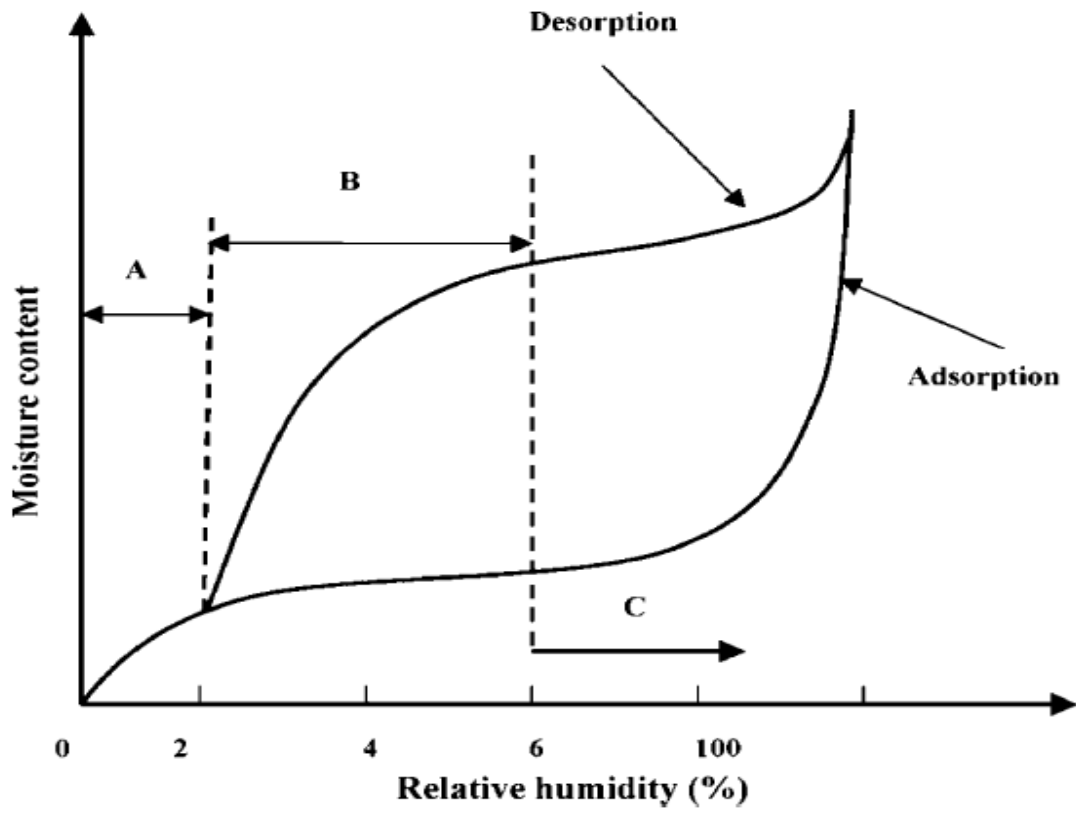


FIGURA 2- Una típica isoterma de sorción mostrando el fenómeno de histéresis (Basu et al. 2006)

A partir de estos conocimientos pueden obtenerse algunos parámetros termodinámicos que proporcionan información acerca de la estabilidad del alimento a una humedad y temperaturas determinadas y una aproximación a la cantidad de energía necesaria para su deshidratación. Con esto se puede evaluar la máxima capacidad de eliminación de agua bajo determinadas condiciones experimentales.

Además es muy importante en el proceso de desorción, la disminución de actividad de agua para inhibir los procesos de deterioro por hongos y diferentes microorganismos y disminuir las velocidades de otras reacciones promovidas por la presencia de agua libre.

## **2.2- ETAPAS EN LA OPERACIÓN DE SECADO**

La operación de secado se divide en tres etapas fundamentales, que describen la manera en que el proceso se lleva a cabo en una relación de contenido de humedad respecto al tiempo. La primera etapa llamada periodo de inducción correspondiente a la fase el que consiste en que el producto sea calentado y aumente su temperatura de interface, esto conlleva a que se produzca una adaptación del material a las condiciones de secado. La segunda etapa se refiere a la eliminación de agua de la superficie del sólido que tiene una velocidad menor que la del agua en el interior del sólido. Esta etapa es también llamada periodo de velocidad de secado constante. Por último la etapa de velocidad de secado decreciente, donde la humedad del solido disminuye hasta alcanzar el equilibrio. A continuación se describen de una forma más precisa la etapa dos y tres del secado.

### **2.2.1 PERÍODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE**

El período de velocidad de secado constante para productos biológicos con alto contenido de humedad, depende de tres parámetros externos: la velocidad del aire, temperatura del aire y la humedad del aire. El periodo de velocidad de secado constante se presenta en productos donde la resistencia



interna al transporte de humedad es mucho menor que la resistencia externa a la remoción del vapor de agua de la superficie del producto. Este período de secado deja ser de velocidad constante y pasa a ser de velocidad decreciente cuando el contenido de humedad de la muestra es el contenido de humedad crítico.

### **2.2.2 PERÍODO DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE**

Durante el período de velocidad de secado decreciente la superficie del producto a secar no está cubierta con una capa delgada de agua, debido a que la resistencia interna al transporte de humedad ha llegado a ser mucho mayor que la resistencia externa. Como el contenido de humedad del producto ha descendido del punto crítico, el potencial de secado del proceso decrece con la velocidad de secado. Esta parte del proceso de secado finaliza cuando la humedad de equilibrio del producto llega a ser el óptimo para el almacenamiento del producto.

## **2.3 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA DEL AIRE**

Existen diferentes tipos de sensores para determinar la humedad relativa del aire, en este trabajo se utilizara un higrómetro eléctrico (sensor de humedad) para determinar este parámetro. A continuación se da una explicación del funcionamiento y características de este tipo de sensor.

### **2.3.1 SENSOR HIGROMÉTRICO ELÉCTRICO (SENSOR DE HUMEDAD)**

Muchos instrumentos comerciales basados en los sensores higrométricos eléctricos están disponibles para la medición de la humedad relativa del aire  $a_w$ . Hay dos tipos de higrómetros eléctricos: sensores tipo capacitivo o resistivo. Ambos trabajan bajo el mismo principio, en el que un

material () cambiando la respuesta eléctrica como una función de la humedad relativa. Dependiendo de la presión de vapor del agua del aire circundante, absorberá o no agua dentro del sensor y cambiara sus propiedades eléctricas del material del higrómetro. El sensor debe estar calibrado para convertir el valor de la resistencia o capacitor a unidades de la humedad relativa. Todos, estos instrumentos miden la humedad relativa ( $a_w$ ) en un rango de 0 a 1.0  $a_w$  con una resolución de  $\pm 0.001 a_w$  y una exactitud de entre 0.01 y 0.02  $a_w$ .

Las diferencia de temperatura entre el producto y el sensor pueden causar errores grandes. A una alta humedad relativa, a una temperatura de 0.1 °C los resultados difieren en un 0.006  $a_w$  de error.

Así como existen diferentes sensores para medir la humedad del aire también existen muchos dispositivos para poder determinar la temperatura, los más utilizados son los termopares.

### **2.3.2 TERMOPARES**

Termometría termopar una de las técnicas más ampliamente utilizadas para medir la temperatura. Los termopares ofrecen ventajas de ser capaces de operar en un amplio rango de temperaturas y son de bajo costo. Uno de los principales factores que determinan el rendimiento del termopar como la precisión, tiempo de respuesta y la repetibilidad es la calidad de la unión (Triantafyllidis et al. 2003).

## **2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PROCESO DE SECADO**

En el proceso de secado, la transferencia de calor y la transferencia de masa, dadas a su vez simultáneamente, se presentan por 2 razones principales:

### 2.4.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

Primeramente la transferencia de calor es la consecuente de aportar la energía necesaria para que exista una transformación del agua en vapor, la segunda es responsable de la transferencia que hay entre la masa de vapor que se encuentra dentro y en la superficie del producto. El calor suministrado por el aire provoca que el producto que se está secando tenga un aumento en la temperatura.

El secado de algún tipo de producto esta acoplado a la transferencia de calor y masa, donde por este proceso el producto logra reducir su volumen, debido a la relación entre la temperatura cerca de los alimentos durante el secado con una calidad de producto seco (Pavón-Melendez et al. 2002). La temperatura y humedad son dos factores importantes del control ambiental interior en el proceso de secado de algún producto.

### 2.4.2 TRANSFERENCIA DE MASA

La remoción de humedad puede darse por distintos mecanismos, algunos de ellos en el transporte de líquido-agua son: flujo capilar, difusión en la superficie, difusión líquida, mientras que en el transporte de agua-vapor puede darse por: difusión de Knudsen, difusión mutua, difusión de Steffan, flujo Poiseuille y evaporación-condensación.

En la deshidratación de alimentos, el mecanismo de transporte de difusión se asume y la tasa de movimiento de humedad esta descrita por una difusividad efectiva  $D_{eff}$ , sin importar el mecanismo que se esté utilizando. La ley de Fick de difusión se utiliza para obtener el transporte de humedad en el proceso y está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{dif} = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx} \text{-----} 2.5$$

Donde:

$D_{AB}$  es el coeficiente de difusión (o difusividad de la masa) de la especie en la mezcla y  $C_A$  es la concentración de esa especie en la mezcla en ese lugar (Stefan-boltzmann y Boltzmann s. f.)

## **2.5 MODELO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN EL PROCESO DE SECADO**

El proceso de secado es gobernado por un acoplamiento fuerte entre el transporte de calor y masa, ambos dentro del material y en la interface con el aire seco, y es afectado por un número de parámetros, incluyendo las propiedades del material de la comida y condiciones externas de secado, tales como la temperatura y la humedad relativa del aire (Tzempelikos et al. 2015).

El modelo matemático es una herramienta muy importante, lo cual contribuye a un mejor entendimiento del transporte de calor y masa, mientras, cuando es simplemente formulado, es también una herramienta muy útil en la mejora del diseño y el control del proceso de secado en las industrias de alimentos (Tzempelikos et al. 2015).

Los mecanismos para remover la humedad del producto son supuestos que: (i) el transporte de humedad a través del material del producto por difusión líquida, (ii) la evaporación del agua en la superficie. No hay cambio de fase, i.e la evaporación ocurre dentro del producto, una suposición adecuada para la difusión basada en el tipo de modelo, y quedando en términos de la conservación de masa (Datta, 2007a, Zhang and Datta, 2004).

La fuerza conductiva para la difusión del agua dentro del producto es desarrollada por el gradiente de concentración por la evaporación del agua sobre la superficie, debido a la diferencia de presión parcial de vapor del agua entre la superficie y el aire. La difusión del agua dentro del producto es asumida por la Ley de Fick (Tzempelikos et al. 2015).

Considerando los mecanismos descritos con anterioridad y suponiendo, que la transferencia de calor y masa es unidimensional pueden ser escritas de la siguiente manera (Tzempelikos et al. 2015).

1. La transferencia de calor por conducción y la difusión de masa se dan simultáneamente en el interior de los alimentos. La descripción matemática para geometrías generalizadas están dadas por:

$$\frac{\partial [C_p \rho T_\beta]}{\partial t} = \nabla \cdot [k \nabla T_\beta] \text{-----} 2.6$$

$$\frac{\partial [\rho_\beta X_\beta]}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{eff} \nabla (\rho_\beta X_\beta)] \text{-----} 2.7$$

2. La transferencia de calor por convección en el lado donde el aire está en contacto con la superficie del producto, que es igual al flujo de calor por conducción de ese lado del producto, menos el calor requerido para remover el agua:

$$h [T_{\gamma i} - T_\gamma] + Q = -\mathbf{n}_{\beta\gamma} \cdot k \nabla (T_{\beta i}) + \mathbf{n}_{\beta\gamma} \cdot D_{eff} \nabla (\rho_\beta X_{\beta i}) \Delta H_s \text{---} 2.8$$

3. La transferencia de masa por convección en el lado donde el aire está en contacto con la superficie, que es igual al flujo de difusión de agua por el lado del cuerpo:

$$k_c \rho_\gamma [X_{\gamma i} - X_i] = -\mathbf{n}_{\beta\gamma} \cdot D_{eff} \nabla (\rho_\beta X_{\beta i}) \text{-----} 2.9$$

Las ecuaciones (2.8) y (2.9) son condiciones de fronteras para las ecuaciones (2.6) y (2.7). Las variables en la interface fueron definidas en términos de relaciones de equilibrio de la siguiente manera (Pavón-Melendez et al. 2002):

$$T_{\beta i} = T_{\gamma i}, \quad X_{\gamma i} = \frac{(p_{wv}/p_{\gamma})a_w}{1 - (p_{wv}/p_{\gamma})a_w} \frac{18}{29} \text{-----} 2.10$$

La relación  $a_w = f(X_{\beta i}, T_{\beta i})$  es conocida como isoterma de sorción. La humedad en la comida que satisface la ecuación (2.10) con la humedad del aire ( $X_{\gamma}$ ) es por definición la humedad de equilibrio de los alimentos ( $X_{\beta e}$ ) (Pavón-Melendez et al. 2002).

## **CAPÍTULO 3.- DISEÑO DEL EQUIPO**

En este capítulo se harán menciones de las consideraciones de diseño para la realización del equipo, así también el diseño preliminar del equipo proporcionando la geometría con sus respectivas dimensiones y sus vistas realizado en el software de SOLIDWORKS. Por otro lado se mencionan las condiciones de operaciones del equipo las cuales nos dará idea para una selección del material.

### **3.1- CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

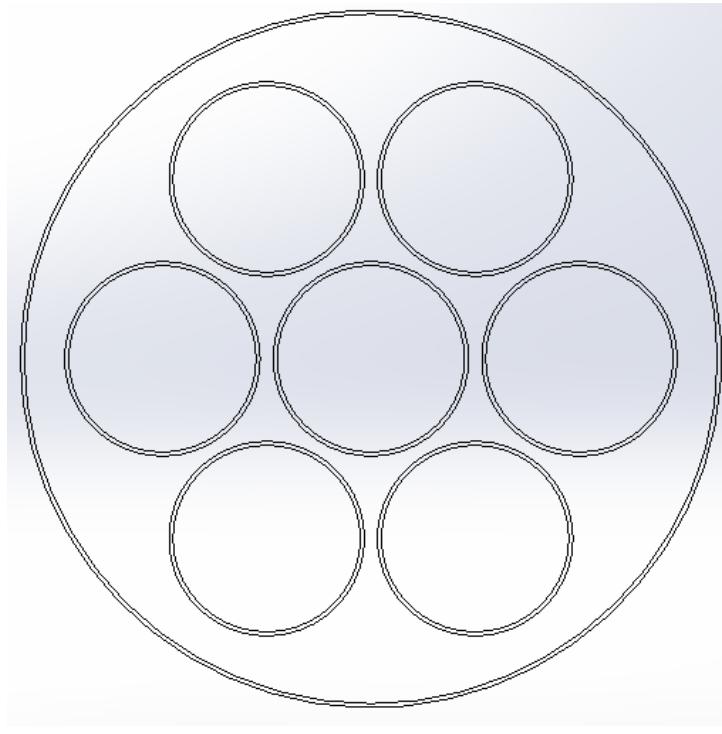
Para un diseño cuidadoso del equipo que determine la humedad de equilibrio, se necesita conocer los parámetros posibles del producto así también las condiciones de operaciones a la que el equipo estará operando.

Como se mencionó con anterioridad la humedad de equilibrio de un producto depende de muchos parámetros, la temperatura es uno de los parámetros más importantes para la determinación de esta, para lo cual se ha considerado en este trabajo mantener una temperatura de 60 °C dentro de una cavidad, la cual se lograra alcanzar mediante una fuente de calor que estará dentro de la misma cavidad.

La fuente de calor nos proporcionara un flujo de calor de  $600\text{W}/\text{m}^2$  de forma unidimensional en el equipo, a través de este flujo las paredes de los contenedores estarán expuestos a la transferencia de calor por el medio convectivo con el aire que se encuentra entre los espacios de los ductos. Ahora bien el calor que va de la superficie de los ductos hacia el interior de los mismos se lleva a cabo por el medio de conducción, y a través de estos dos medios de conducción de calor se espera elevar la temperatura mencionada anteriormente.

Al comienzo del proyecto solo se había considerado determinar la humedad de equilibrio de una muestra, pero se sabe que el determinar este valor se necesita mucho tiempo ya que el producto debe alcanzar el equilibrio ya sea ganando o perdiendo humedad con un agente. Por lo tanto si el

determinar la humedad de equilibrio de una muestra lleva un tiempo prolongado se decidió hacerlo para más de una muestra a la vez, se consideraron realizar esto para siete muestras, así obtendríamos siete humedades en el mismo tiempo que tardaría obtener la de solo una. Por lo tanto se consideró el siguiente diseño para las siete muestras. Para una mejor distribución del calor a través de la superficie de los ductos y exista una mejor transferencia de calor se optó por la siguiente configuración.



*FIGURA 3- Configuración de los ductos dentro del sistema.*

Se ha hecho la consideración de que el sistema no perderá calor en ninguna dirección ya que las paredes estarán aisladas por un material con una conductividad baja.

El realizar estas consideraciones nos ayudara a tener una idea más clara de la geometría y el tamaño del equipo. Una vez obtenida la información necesaria se procedió a realizar el diseño en el software comercial SOLIDWORKS.



### 3.2- DISEÑO DEL EQUIPO EN EL SOFTWARE SOLIDWORKS

Antes de dimensionar las geometrías se realizaron investigaciones acerca de los diámetros comerciales disponibles en ductos de acero inoxidable, se escogió el ducto con un diámetro de 76.2 mm y con un espesor de pared de 1.6 mm, mediante estas dimensiones se realizaron las geometrías de los ductos que estarán dentro de la cavidad. Ahora para el ducto de diámetro mayor se consideraron las dimensiones siguientes un diámetro exterior de 273.05 mm y el mismo espesor de pared del ducto pequeño.

#### 3.2.1- VISTAS DEL EQUIPO EN 2D Y 3D

En la figura 3.2 se muestra la vista frontal del equipo, con sus respectivas cotas. En el centro podemos observar que se encuentran 7 círculos del mismo diámetro los cuales están rodeados por uno de mayor diámetro. Los círculos pequeños son los contenedores en los que se encontraran los productos y el círculo de diámetro mayor es la cavidad que estará aislada. Se presentan las dimensiones para cada geometría del equipo.

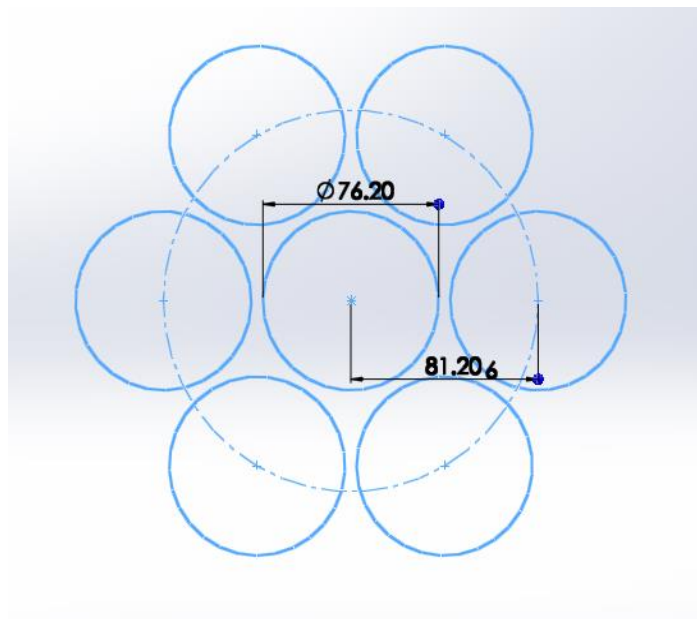
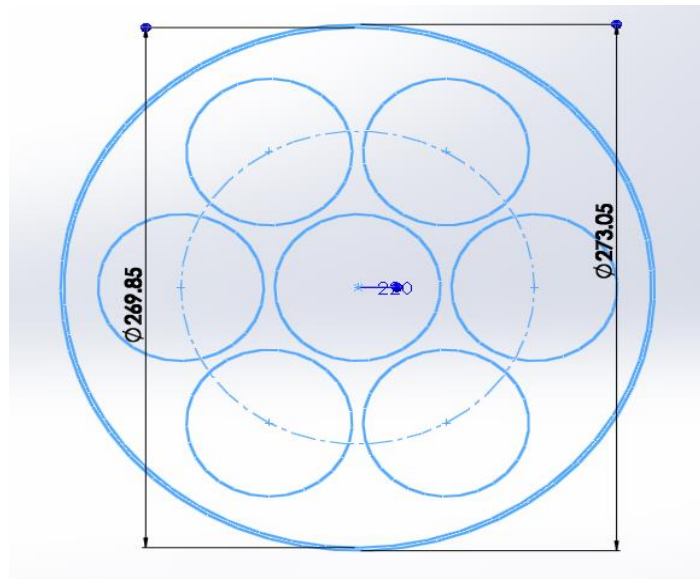
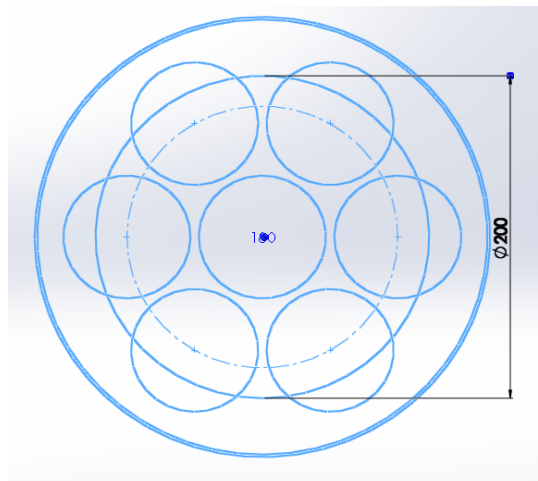


FIGURA 4- Dimensiones de los ductos interiores



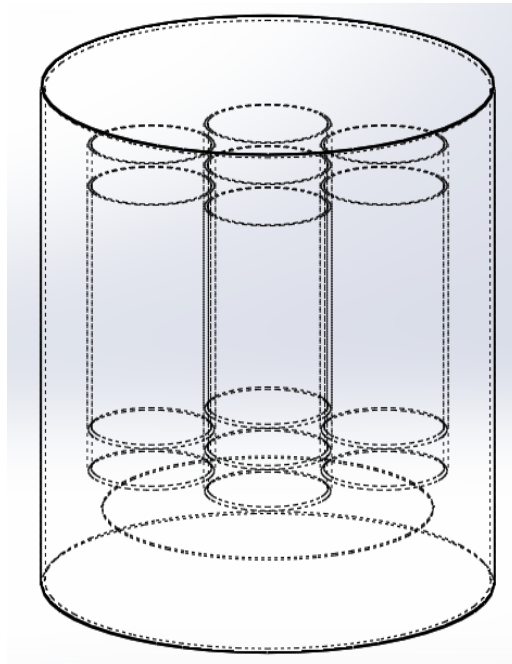
*FIGURA 5- Dimensiones del ducto mayor*

La representación de la fuente de calor en el equipo se muestra en la siguiente figura. La posición de este se encuentra a 30 mm debajo de la base de los ductos pequeños. Para la fuente de calor se colocara una resistencia que cumpla con los requisitos de operación, para el diseño en el software se consideró una placa de 200 mm de diámetro con un espesor de 1 mm. En la figura 3.2 podemos observar un círculo concéntrico al círculo mayor, también se observa como la placa rodea a los ductos.



*FIGURA 6- Dimensión de la fuente de calor*

En la figura siguiente se puede observar el modelo final del equipo, podemos identificar cada componente del equipo los ductos internos, la fuente de calor y la cavidad que los contiene. Este diseño es el que se simulara en el FLUENT el cual se describe en el capítulo siguiente, en esta figura también se puede observar la separación que existe entre cada ducto, esto se hará para que a través de ese espacio fluya aire para una mejor transferencia de calor hacia el interior de los ductos.

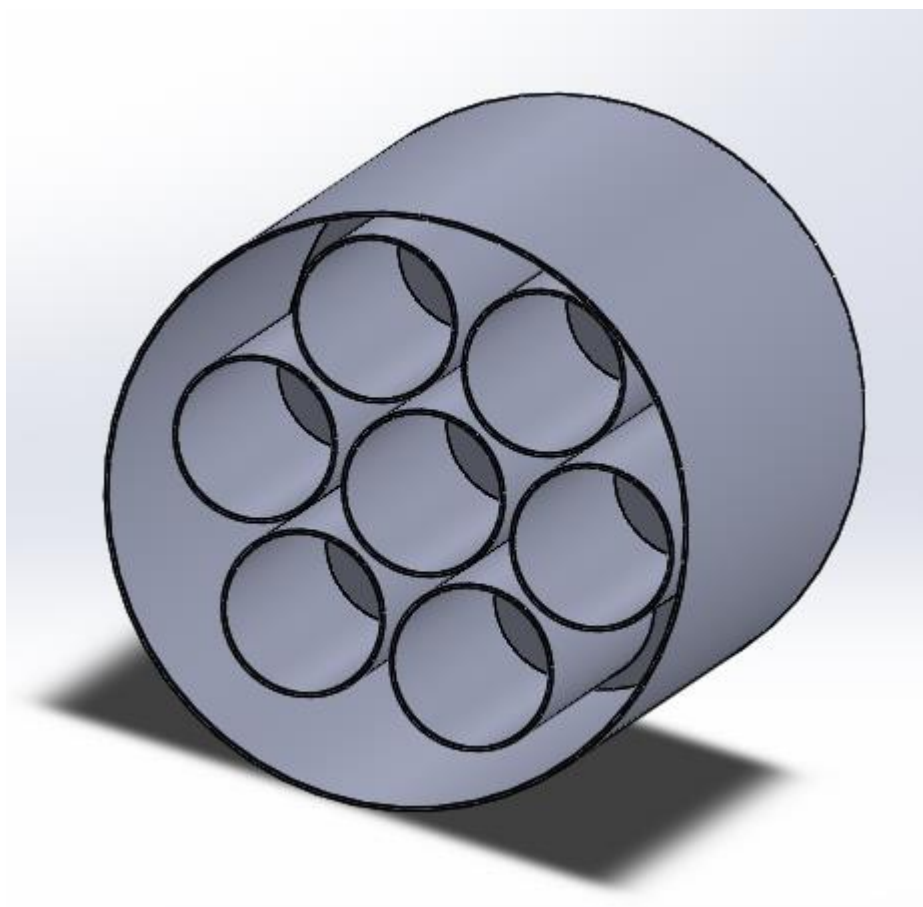


*FIGURA 7- Vista isométrica del equipo (solidworks)*

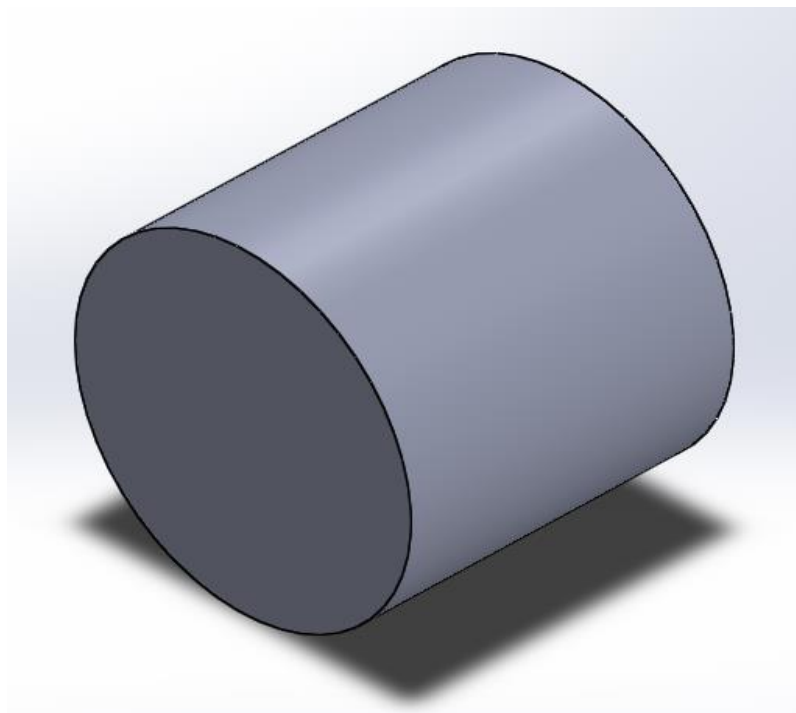
### **3.2.2- VISTAS DEL EQUIPO SÓLIDO**

Aquí se presenta el modelo del equipo pero ya como un sólido, se le asignó el material que se ha propuesto para la simulación, el material es el acero inoxidable, se puede observar de mejor manera los componentes del equipo en la figura que se le realizó un corte transversalmente en un plano medio.

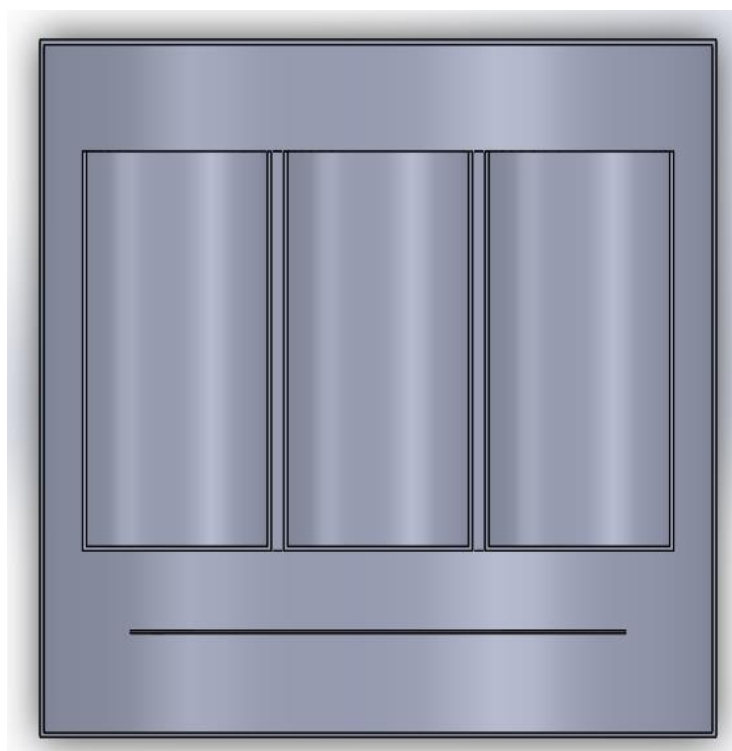
El diseño se realizó primero en este software debido a que cuando se terminaba de hacer una componente del equipo en ocasiones se tenía que modificar y esto cambia todo el diseño, cuando se terminó de realizar todos los elementos con las dimensiones adecuadas se prosiguió a dibujar en el FLUENT para la simulación.



*FIGURA 8- Vista del equipo en solido*



*FIGURA 9- Vista del equipo terminado en solidworks*



*FIGURA 10- Vista de sección*

## **CAPÍTULO 4.- SIMULACIÓN DEL EQUIPO**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la simulación que se realizó, con el fin de conocer el comportamiento de la temperatura dentro de la cavidad del equipo. Para la elaboración de esta simulación, se utilizó el software FLUENT, que está basado en el método de volumen finito. La simulación desarrollada permite determinar si la distribución de los ductos y la colocación de la fuente de calor son lo más adecuadas, al observar la distribución de la temperatura dentro del equipo. Así también se explica cómo es el área de trabajo del FLUENT, en que consiste y que ecuaciones resuelve para darnos la respuesta del equipo.

### **4.1- FUNDAMENTOS DE FLUENT**

Para un mejor diseño del equipo es necesario realizar un estudio de transferencia de calor entre las superficies de los ductos y el aire entre las separaciones que existe entre ellos y a partir de este estudio determinar la mejor colocación de los ductos y la fuente de calor. La técnica de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) es una herramienta excelente para la simulación del comportamiento de fluidos y de transferencia de calor. Esta técnica es muy poderosa y se extiende a un amplio rango de áreas de aplicación industrial y no industrial. Y para llevar a cabo este estudio se utilizó el software comercial FLUENT que utiliza esta técnica de CFD. A continuación se realiza una descripción del paquete comercial FLUENT.

FLUENT es un programa de computadora para modelación de fluidos y transferencia de calor en geometrías complejas y está escrito en lenguaje C. este programa se basa en lo siguiente:

- 1.- El revolvedor está basado en el método de volumen finito.
- 2.- El dominio es discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control.
- 3.- Ecuación general de conservación (transporte) para masa, momentum, energía, etc. (ecuación 3.1)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \phi dV + \oint \rho \phi V dA = \oint \tau \nabla \phi dA + \int S_{\phi} dV \text{ ----- } -3.1$$

El primer término de la ecuación es debido a las fluctuaciones, el segundo término se debe a la convección, el tercer término se debe a la difusión y por último se tiene la generación de energía.

La ecuación es discretizada para obtener ecuaciones algebraicas. Todas las ecuaciones son resueltas para producir el campo de flujo.

Para calcular una solución y mostrar resultados, FLUENT utiliza una interface interactiva a través de menús. La interface está compuesta por tres elementos principales un procesador, un resolvidor y un post-procesador.

#### 4.1.1- MODELOS DE FLUENT

A continuación se mencionan algunos de los diferentes modelos que puede resolver FLUENT:

- Geometrías de flujos en 2D y 3D utilizando una solución adaptada de mallados poco estructurados triangulares/ tetraédricos, cuadrados/ hexaédricos o mixtos (híbridos) que incluyen prismas o pirámides.
- Flujos compresibles e incompresibles.
- Análisis en estado transitorio o permanente.
- Flujo no viscosos laminares o turbulentos.
- Flujos newtonianos o no newtonianos.
- Transferencia de calor convectivo, incluyendo convección natural y forzada.
- Transferencia de calor radiactiva.
- Transferencia de calor conductiva/ convectiva acoplada.
- Flujos multifasicos incluyendo cavitación, etc.

Esto permite a FLUENT ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, como algunas que se mencionan a continuación:

- Aplicaciones de turbomaquinaria y aeroespacial.
- Aplicaciones automovilísticas.
- Aplicaciones de intercambiadores de calor.
- Aplicaciones de procesamiento de materiales.
- Diseño arquitectónico e investigación en temas de combustión.

En resumen FLUENT es idealmente apropiado para simulaciones en fluidos compresibles e incompresibles en geometrías complejas.

#### **4.1.2- PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA EN FLUENT**

Los pasos principales para la solución de un problema utilizando FLUENT son los siguientes:

1. Crear el modelo geométrico y mallar.
2. Iniciar la modelación con el resolovedor para 2D o 3D.
3. Importar la malla.
4. Checar la malla.
5. Seleccionar la formulación del resolovedor (resolovedor segregado, acoplado implícito o explícito).
6. Elegir las ecuaciones básicas para resolver: Laminar o turbulento, especies químicas o reacciones, modelos de transferencia de calor, etc.
7. Especificar las propiedades del material.
8. Especificar las condiciones de frontera.
9. Ajustar la solución con los parámetros de control.
10. Inicializar el campo de flujo.
11. Calcular la solución.
12. Examinar los resultados.
13. Guardar resultados.



14. Si es necesario, refinar la malla o considerar revisiones para el modelo físico o numérico.

### 4.1.3- ESQUEMAS NUMÉRICOS DE FLUENT

FLUENT te permite elegir dos métodos de solución numérica que a continuación se mencionan:

- Resolvedor segregado.
- Resolvedor acoplado.

Utilizando cualquier método, FLUENT va a resolver las ecuaciones integrales gobernantes para la conservación de masa, momentum y energía y otros escalares tal como la turbulencia y especies químicas. Ambos casos están basados en la técnica de volumen de control que consiste en lo siguiente:

- La división del dominio en el volumen de control discreto utilizando un mallado computacional.
- Integración de las ecuaciones gobernantes en volúmenes de control individual, para construir ecuaciones algebraicas para las variables discretas dependientes (desconocidas), tales como la velocidad, la presión, la temperatura y escalares conservados.
- La linealización de las ecuaciones discretizadas y solución del sistema de ecuaciones resultantes obteniendo valores de las variables dependientes.

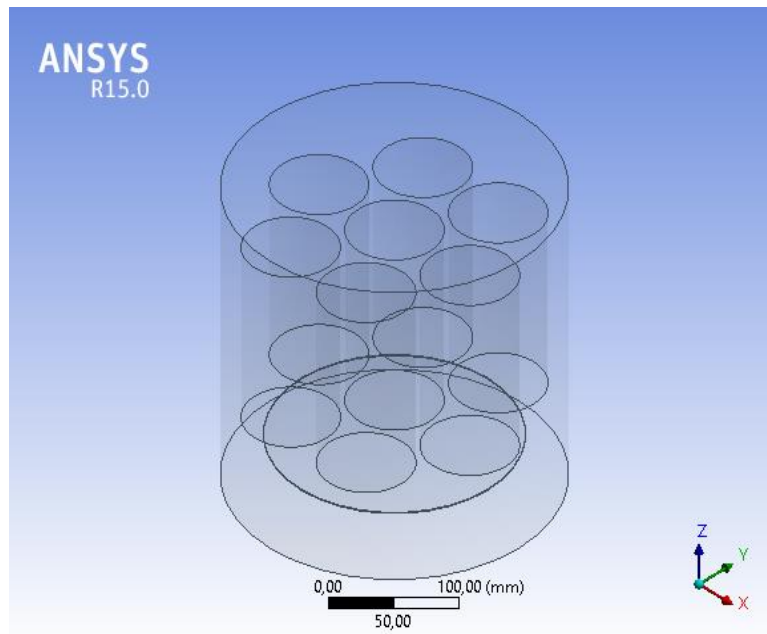
En los métodos numéricos emplean un proceso similar de discretización (volumen finito), pero su planteamiento utilizado para linealizar y resolver las ecuaciones discretizadas es diferente.

## 4.2- GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA

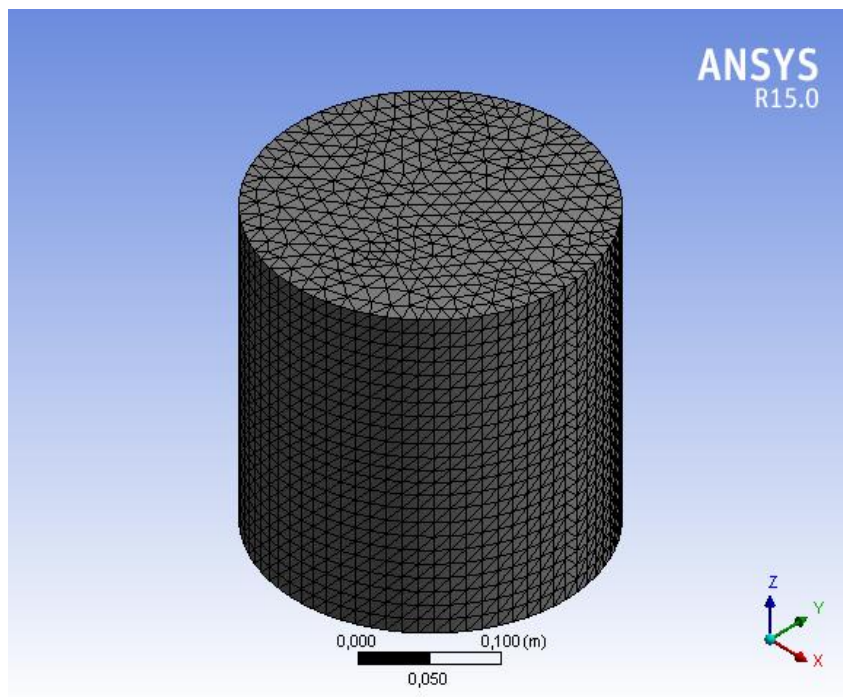
En esta sección se describe el proceso para la obtención de la geometría del equipo. Se presenta la distribución de los ductos dentro de la cavidad como se mencionó en el capítulo 3. A continuación se describe el equipo.

### 4.2.1- EQUIPO DISEÑADO EN FLUENT

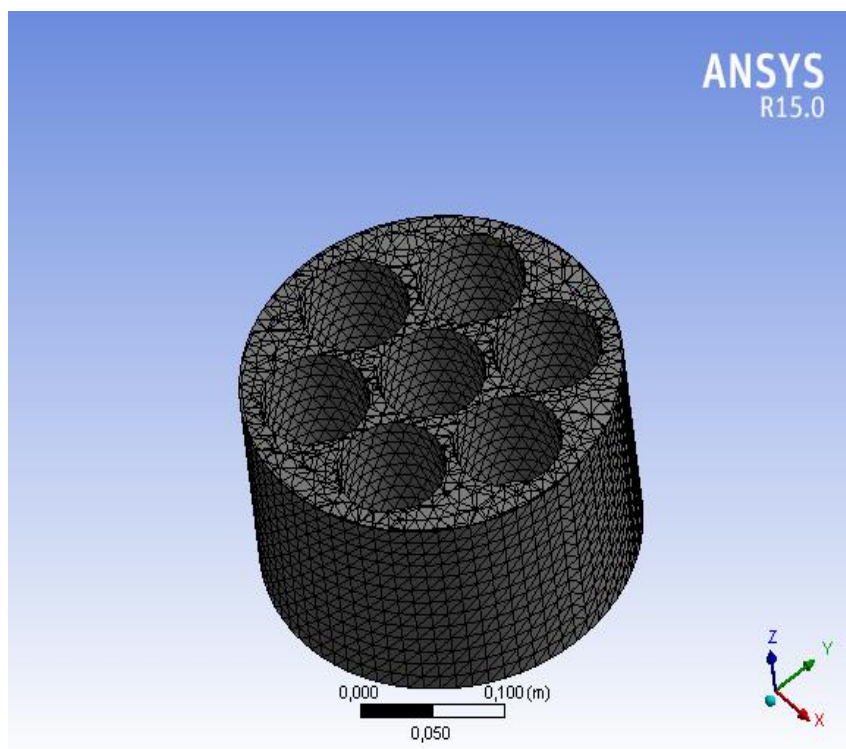
El equipo como se muestra en la figura 3.1 y 3.2 fue realizada en FLUENT, el realizar este diseño en este software requiere más tiempo ya que el área de trabajo es más compleja que el solidworks. Para la construcción de los ductos realice la creación de varios planos, el hacerlos en solidworks es más rápido con la opción de realizar una matriz circular. Para la simulación de la fuente de calor se consideró a la resistencia como una placa de 200 mm de diámetro y espesor de 1 mm para una mayor facilidad en la simulación. El equipo se le aplico un mallado por Multizona, ya que dentro de él existen 8 solidos los 7 ductos y la fuente de calor. El material asignado a los ductos fue acero inoxidable para la simulación.



*FIGURA 11- Vista isométrica del equipo*



*FIGURA 12- Mallado del equipo por Multizonas*



*FIGURA 13- Vista de sección del mallado*

### 4.3- SIMULACIÓN EN FLUENT

Una vez generada la geometría del equipo, se importa la geometría al simulador FLUENT en donde se determinara la solución de transferencia de calor en el equipo. Para ello, se siguen los pasos de solución de la sección 4.1.2. A continuación, se muestran las condiciones que se utilizaron en FLUENT en el equipo para la simulación de transferencia de calor:

1. Las simulaciones son en 3D.
2. Las propiedades de fluido (aire) son las siguientes: Densidad  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ , Calor específico  $C_p=1006.43 \text{ J/kg-K}$ , Conductividad térmica  $k=0.0242 \text{ W/m-K}$ , Viscosidad  $\mu=1.784 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ .
3. Las propiedades del acero inoxidable son las siguientes: Peso específico  $\gamma=7.9 \text{ g/cm}^3$ , Modulo de elasticidad  $E=193000 \text{ N/mm}^2$ , Calor específico  $C_p=500 \text{ J/kg-K}$ , Conductividad térmica  $k=16 \text{ W/mK}$ .
4. Las ecuaciones de continuidad, momentum y energía son resueltas con el algoritmo segregado.
5. Las condiciones de frontera son las siguientes: Existe un flujo de calor de  $600 \text{ W/m}^2$  que está generando la fuente de calor, la superficie de la cavidad está completamente aislada, así también su base y tapa, considerando que no existe perdidas en el equipo.
6. El resolvidor se inicializa hasta alcanzar la convergencia.

Una vista del equipo antes de poder observar la distribución de calor dentro de la cavidad, se observa la geometría en el CFD de la siguiente forma:

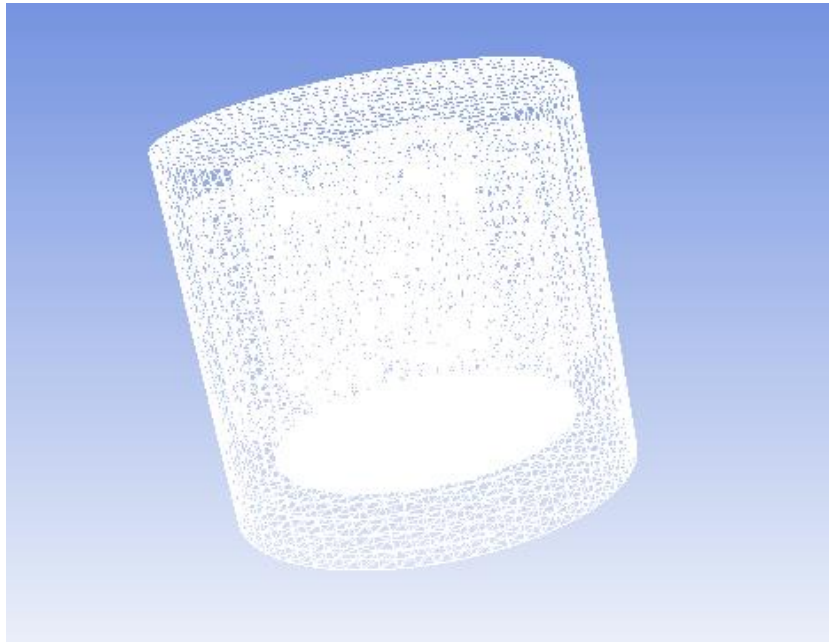


FIGURA 14- Vista isométrica del equipo en el proceso de la simulación

#### **4.4- RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FLUENT**

Los resultados para la transferencia de calor dentro del equipo se muestran en las siguientes figuras. En estas figuras se muestra la distribución de temperaturas dentro del equipo. Y en la gráfica se muestra como el sistema llega a la convergencia después de varias iteraciones.

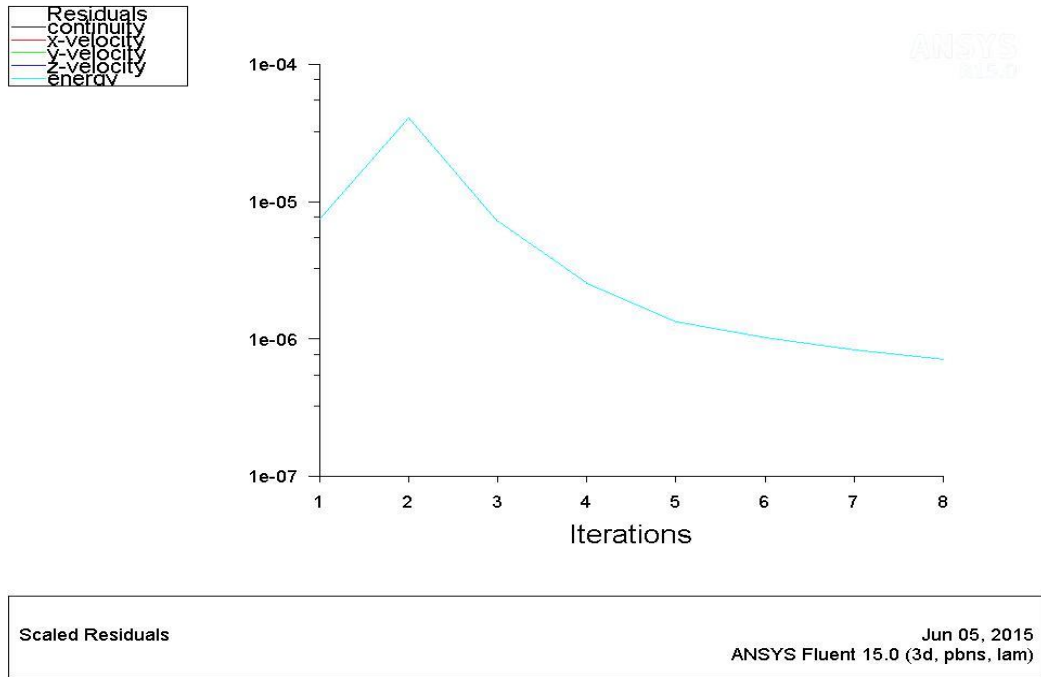


FIGURA 15- Grafica de comparación Energía-Iteraciones

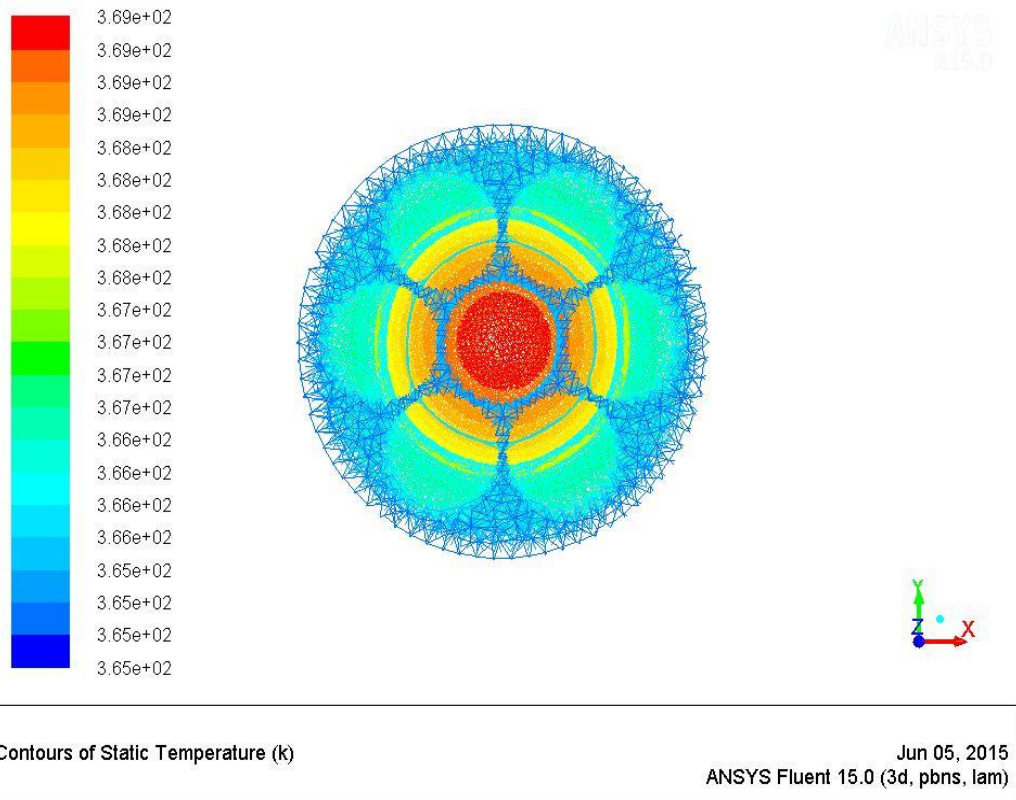


FIGURA 16- Vista frontal de la distribución de temperatura en el interior de la cavidad

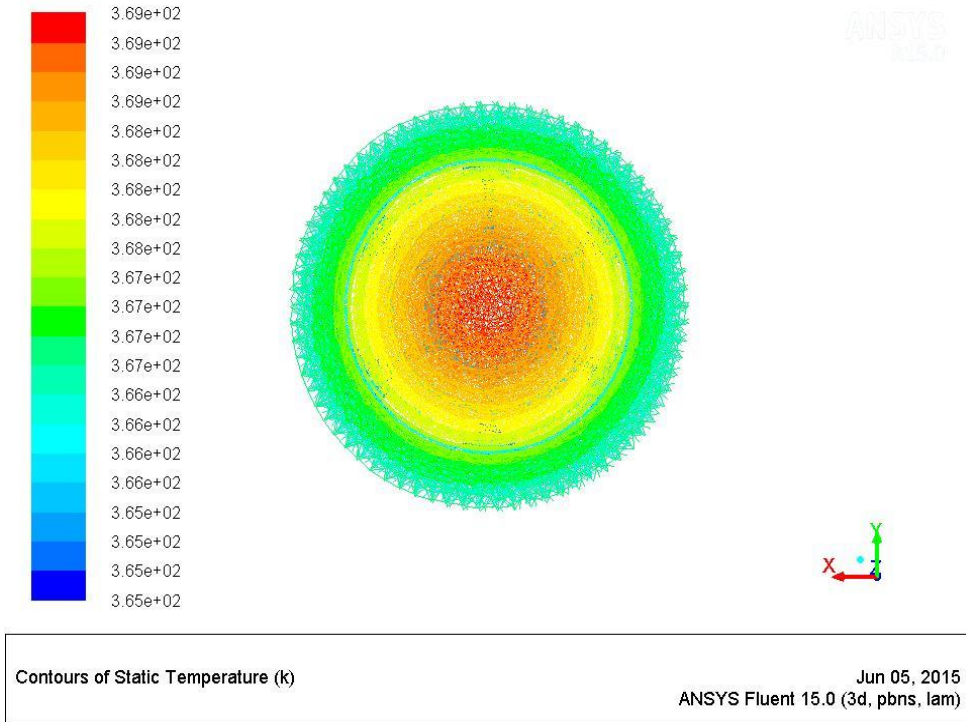


FIGURA 17- Vista de la distribución de temperatura en la parte inferior del equipo

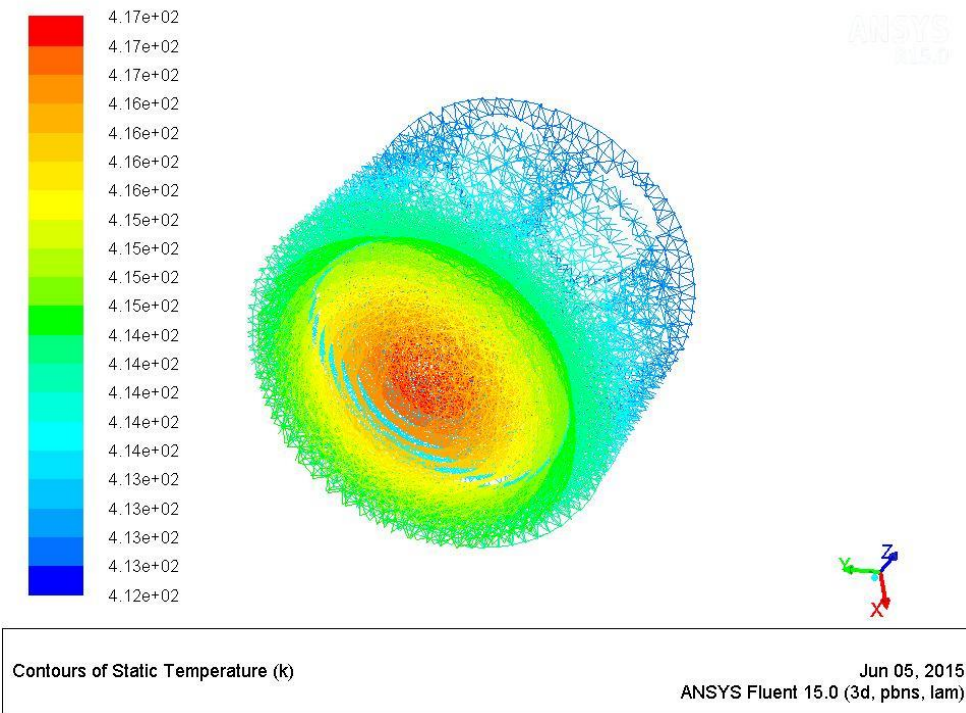


FIGURA 18- Contornos de la distribución de la temperatura en una vista isométrica



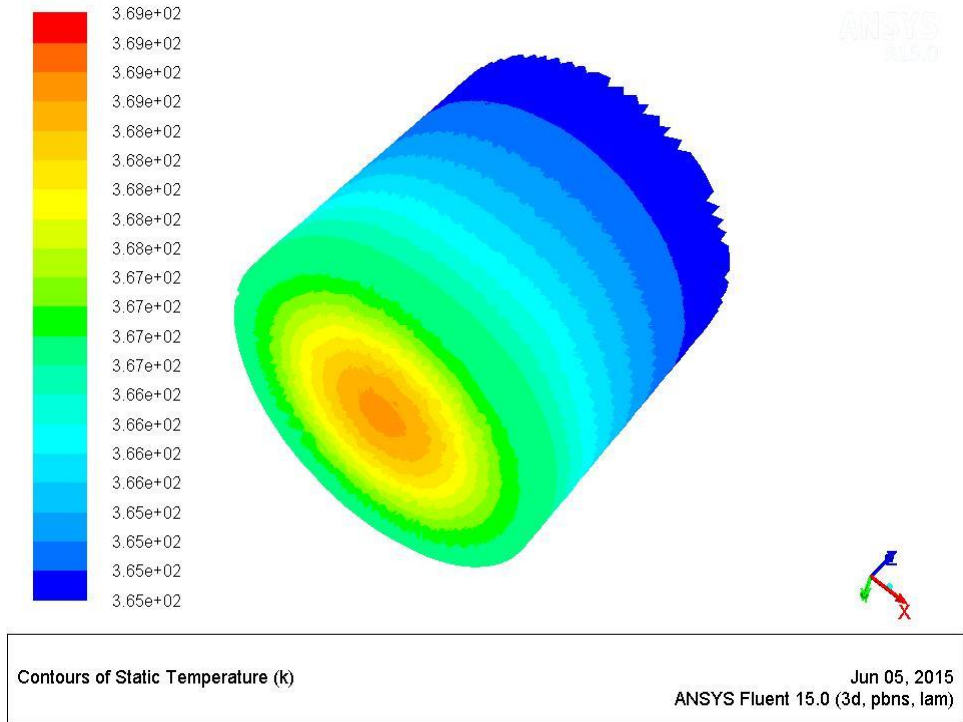


FIGURA 19- Distribución de la temperatura en el equipo (llenado)

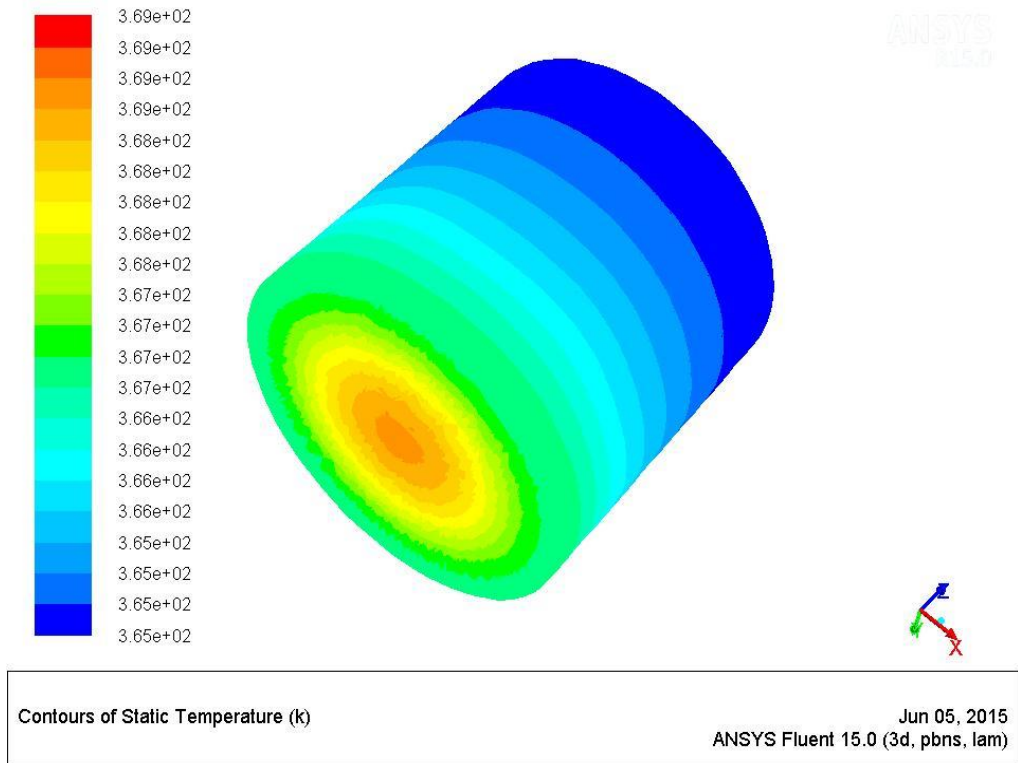


FIGURA 20- Distribución de la temperatura en la superficie e interior del equipo



Analizando las figuras y observando la distribución de las temperaturas se puede decir que la temperatura mínima está en la parte superior de la cavidad, la simulación se inicializo con una temperatura de 30 °C y una velocidad mínima de  $V=0.1$  m/s para una mejor transferencia de calor. La diferencia que existe entre la temperatura que se encuentra al nivel de la fuente de calor y la parte superior de la cavidad es muy pequeña, esto se debe a que se está considerando que no existe perdida de calor en ninguna dirección ya que la superficie está completamente aislada, y se ha visto que los equipos por mejor asilados que estén siempre existirá perdidas, el aislar un equipo no nos asegura que no se pierda calor simplemente reducimos esa pérdida a lo mínimo posible. Y en este trabajo se consideró que no existe perdida alguna de calor y por lo tanto la temperatura se mantiene casi a la misma temperatura.

## CAPÍTULO 5.- CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones más importantes que se llegaron al final del trabajo.

### 5.1- CONCLUSIONES

Se diseñó un equipo para determinar el contenido de humedad de equilibrio del chile habanero. Utilizando el software comercial FLUENT se analizó el comportamiento de la distribución de la temperatura en el interior de una cavidad.

De los resultados obtenidos se concluye que:

La pérdida de calor en las paredes del equipo es poca, esto se debe a que se está considerando un aislante en el cual no existe nada de pérdida de calor y esto lleva a que la temperatura en el interior de la cavidad se mantenga casi constante, la diferencia de temperatura en la parte inferior con la posterior es muy poca.

La temperatura máxima que se alcanzó es de 96 °C, proporcionando un flujo de calor de 600 W/m<sup>2</sup> y disminuyo hasta alcanzar una temperatura mínima de 91 °C. Se propuso un flujo de aire con una velocidad de  $v=0.1$  m/s, y una temperatura de inicio de 30 °C. Debido a que el equipo no tiene pérdida de calor el sistema converge en pocas iteraciones.

Así también sabemos que la humedad relativa depende de la temperatura y es por ello que la simulación se realizó para estudiar con que geometría y con qué condiciones podemos alcanzar la temperatura necesaria.

La simulación del equipo se realizó para observar si el modelo que se diseño era el adecuado, si la colocación de la fuente de calor en esa posición daba una distribución de temperatura uniforme, y observando la geometría podemos concluir que es una buena opción para poder construir bajo estas condiciones y las medidas correspondientes

## REFERENCIAS

- Stencl J., Otten L., Gotthardova J., Homola P., 1999. "Model comparisons of equilibrium moisture content of prunes in the temperature range of 15-45 °C", Journal of Stored Products Research, Vol. 35, págs. 27-36.
- Sima Moo E., 1999. "Estudio, caracterización y evaluación de un secador solar de granos de tipo indirecto", Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Tesis.
- Sitompul J.P., Istadi, Sumardiono S., 2000. "Non-linear parameter estimation of EMC/ERH correlations for grain-type products", Proceedings Institut Teknologi Bandung, Lembaga Penelitian ITB, Vol. 32, págs. 411-417.
- Basu S., Shivhare U.S., Mujumdar A.S., 2006. "Model for Sorption Isotherms for Foods: A Review", Drying Technology, Vol. 24, págs. 917-930.
- Sun Da-Wen., , "Comparison and Selection of EMC/ERH Isotherm Equations for Drying and Storage of Grain and Oilseed", Department of Agricultural and Food Engineering.
- Pixton S.W., Warburton S., 1973. "Determination of Moisture Content and Equilibrium Relative Humidity of Dried Fruit-Sultanas", Journal of Stored Products Research, Vol. 8, págs. 263-270.
- Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Tsami E., Marinos-Kouris D., 1993. "Equilibrium Moisture Content and Head of Desorption of Some Vegetables", Journal of Food Engineering, Vol. 20, págs. 55-74.

## REFERENCIAS

- Mohamed L.A., Kouhila M., Lahsasni S., Jamali A., Idlimam A., Rhazi M., Aghfir M., Mahrouz M., 2005. "Equilibrium Moisture Content and Heat of Sorption of *Gelidium Sesquipedale*", *Journal of Stored Products Research*, Vol. 41, págs. 199-209.
- Cordeiro D.S., Raghavan G.S.V., Oliveira W.P., 2006. "Equilibrium Moisture Content Models for *Maytenus ilicifolia* leaves", *Biosystems Engineering*, Vol. 94, págs. 221-228.
- Garcia S.V., Schmalko M.E., Tanzariello A., 2007. "Isotermas de Adsorción y Cinética de Secado de Ciertas Hortalizas y Aromáticas Cultivadas en Misiones", *RIA, INTA, Argentina*, Vol. 36, págs. 115-129.
- Gustavo V. Barbosa-Cánovas, Anthony J. Fontana, Jr., Shelly J. Schmidt, Theodore P. Labuza, 2007. "Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications", Blackwell Publishing, first edition.
- Arabhosseini A., Huisman W., Müller J., 2010. "Modeling of the Equilibrium Moisture Content (EMC) of *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus*)", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 34, págs. 411-416.
- Zomorodian A., Kavoozi Z., Momenzadeh L., 2011. "Determination of EMC Isotherms and Appropriate Mathematical Models for Canola", *Food and Bioproducts Processing*, Vol. 89, págs. 407-413.
- Jensen O.M., 2012. "A Method for High Accuracy Determination of Equilibrium Relative Humidity", *Sensor and Actuators A: Physical*, Vol. 181, págs. 13-19.
- Demarchi S.M., Quintero N.A., De Michelis A., Giner S.A., 2013. "Sorption Characteristics of Rosehip, Apple and Tomato Pulp Formulations as Determined by Gravimetric and Hygrometric Methods", *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 52, págs. 21-26.

## REFERENCIAS

- Basu, S., Shivhare, U.S. & Mujumdar, a. S., 2006. Models for Sorption Isotherms for Foods: A Review. *Drying Technology*, 24(8), pp.917-930.
- Pavón-Melendez, G. et al., 2002. Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. *Journal of Food Engineering*, 51(4), pp.347-353.
- Stefan-boltzmann, C. De & Boltzmann, C. De, No Title.
- Triantafyllidis, D., Schmidt, M.J.J. & Li, L., 2003. Comparison of high power diode laser and Nd:YAG laser microwelding of k-type thermocouples. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3), pp.102-108.
- Tzempelikos, D. a. et al., 2015. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *Journal of Food Engineering*, 156, pp.10-21. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877415000357>.