

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERIA MECÁNICA**

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO

**TEMA:
REDISEÑO DEL SISTEMA DE DESHIDRATADO PARA MEJORAR LA
EFICIENCIA DE UN HORNO PARA FRUTOS**

**AUTOR:
HUGO PATRICIO MUÑOZ ROBALINO**

**DIRECTOR:
LUIS ANIBAL ANDRANGO A**

Quito, abril del 2014

Certifico que la presente tesis ha sido elaborada y desarrollada en su totalidad por el señor Hugo Patricio Muñoz Robalino.

(f) _____

Ing. Luis Andrango

**DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO
DEL TRABAJO DE GRADO**

Yo Hugo Patricio Muñoz Robalino autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Hugo Patricio Muñoz Robalino
CI: 171836151-0

DEDICATORIA

A mis padres por ser un apoyo fundamental en cada paso de mi vida y sobre todo en la culminación de una etapa de éxito en mi carrera profesional.

A mis abuelitos, porque a pesar de la distancia sé que están muy pendientes de mí, y me brindan su respaldo de las decisiones que he tomado.

A mi novia, que durante el desarrollo de la tesis me ha acompañado brindándome su apoyo incondicional.

A mis amigos y familiares que en algún momento me alentaron y respaldaron para culminar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme vivir una vida tan maravillosa, y a mis padres y hermanas por su apoyo incondicional.

A mis compañeros de aula, que con sus valiosos aportes me han ayudado a lograr los mejores resultados para este trabajo de grado.

A los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana que durante las horas de clase, y fuera de ellas, han sabido guiar a los estudiantes con dinamismo y entrega.

A mi grupo scout donde me he podido desenvolver más allá de las aptitudes estudiantiles.

A todos los amigos, familiares y conocidos, que apoyaron directa o indirectamente a la culminación de este proyecto de grado.

JUSTIFICACIÓN GENERAL

En la actualidad la búsqueda por tener energías que no provengan de la quema de derivados del petróleo están en auge, debido a que estas generan grandes cantidades de emisiones de CO₂ a la atmósfera, siendo ya no un problema de los grandes países industrializados, sino un problema de todo el planeta.

Para tal efecto la Organización de las Naciones Unidas mediante el Protocolo de Kyoto en convención sobre el cambio climático en el año de 1998 establece a los países miembros en el artículo 2 literal 1. los siguientes compromisos:

- I. fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional;
- II. investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales

Buscar que esta energía que se está utilizando hoy por hoy sea empleada por un proceso mucho más eficiente con la menor cantidad de pérdidas es posible.

En este caso para incrementar la eficiencia del modelo actual se realizará el estudio completo de cómo se está aprovechando actualmente la energía mediante cálculos de ingeniería de transferencia de calor.

No obstante si los resultados del estudio arrojan incrementos de eficiencia muy bajos se buscará alternativas como la energía solar para crear un sistema mixto de energía.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la empresa Agroapoyo se ha detectado que las condiciones del medio de deshidratado no son las ideales para alcanzar una transferencia de calor efectiva sobre los productos a deshidratar.

El proceso actual del horno deshidratador no dispone de un estudio para minimizar las pérdidas en transferencia de energía (flujo de aire y flujo de calor), por lo cual se tiene un consumo energético que no está siendo aprovechado al máximo.

Se ha encontrado además que el horno deshidratador presenta fugas de aire caliente y un proceso de operación no adecuado para las condiciones de cada producto.

OBJETIVO GENERAL

Rediseñar el sistema de deshidratado para mejorar la eficiencia de un horno para frutos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar las condiciones de deshidratado actuales.
2. Encontrar los problemas asociados con el flujo de aire y la transferencia de calor del horno deshidratador.
3. Diseñar y elaborar los planos de los elementos que permitan una transferencia de calor efectiva en la cámara del horno.
4. Comparar el incremento de la mejora con el estudio preliminar.

HIPÓTESIS

El rediseño del sistema de deshidratado permitirá incrementar la eficiencia del horno según los siguientes parámetros:

- Se mejorará la distribución de aire y flujo de calor en la cámara.
- Se reducirá los tiempos de deshidratado dependiendo de cada producto.
- Se mejorará la calidad del producto obteniéndose un deshidratado uniforme.

ALCANCE

El proyecto tiene como fin realizar un estudio de las condiciones del medio de deshidratado actuales para diseñar elementos que puedan establecer condiciones adecuadas en las áreas donde posiblemente se pueden encontrar los problemas de baja eficiencia en el deshidratador siendo estas:

- Estudio de las condiciones actuales del proceso (humedad inicial, humedad final, tiempo de deshidratado).
- Estudio de la transferencia de calor y flujo de aire en la cámara de deshidratado mediante la simulación CFD.
- Diseño y elaboración de planos de los elementos que mejorarán las condiciones del medio de deshidratado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

JUSTIFICACIÓN GENERAL.....	V
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	VI
OBJETIVO GENERAL.....	VII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	VII
HIPÓTESIS.....	VIII
ALCANCE.....	IX
CAPÍTULO I.....	1
FUNDAMENTOS TEORICOS	1
1.1 Deshidratado de alimentos.....	2
1.2 Condiciones Externas (Proceso 1).....	3
1.2.1 El aire	4
1.2.2 Humedad Relativa.....	4
1.2.3 Humedad Absoluta.....	5
1.2.4 Temperatura de bulbo seco (T_G)	5
1.2.5 Temperatura de bulbo húmedo (T_W).....	5
1.2.6 Punto de rocío	6
1.2.7 Volumen específico del aire seco.....	7
1.2.8 Mezcla Gas-Vapor	7
1.2.9 Psicometría.....	8
1.2.9.1 La carta Psicrométrica	8
1.3 Condiciones Internas (Proceso 2).....	9
1.3.1 Contenido de humedad en los sólidos.....	10
1.3.2 Isoterma de adsorción (sorción).....	13
1.3.3 Histéresis adsorción-desorción.....	14
1.3.4 La curva de secado	15
1.3.5 Actividad de agua en los alimentos.....	16

1.4	Propiedades organolépticas.....	17
1.5	Transferencia de Calor (Métodos de calentamiento).....	17
1.5.1	Convección.....	18
1.5.2	Conducción	19
1.5.3	Aislamiento de Calor.....	21
1.6	Métodos de deshidratado	21
1.6.1	Deshidratado por evaporación	21
1.6.1.1	Fundamento del deshidratado por evaporación.....	22
1.6.2	Deshidratado por arrastre	24
1.6.2.1	Fundamento del deshidratado por arrastre.	24
CAPÍTULO II		26
PARÁMETROS DEL EQUIPO DESHIDRATADOR Y DEL PROCESO		26
2.1	Características técnicas del deshidratador por lotes	27
2.2	Características específicas del deshidratador.....	27
2.3	Diagrama del horno deshidratador.....	29
2.4	Diagrama de flujo del proceso	30
2.5	Observaciones realizadas	31
2.5.1	Productos en el proceso.....	31
2.5.2	Del horno.....	34
2.6	Resultados del análisis	34
CAPÍTULO III.....		35
ANÁLISIS Y REDISEÑO		35
3.1	Dinámica computacional de fluidos (CFD)	36
3.1.1	Ecuaciones de Navier-Stokes	38
3.1.1.1	Ley de la conservación.....	38
3.1.1.2	Ecuación de Navier-Stokes	39
3.1.1.3	Forma general de la ecuación de Navier-Stokes	41

3.1.2	Método del volumen finito.....	42
3.1.2.1	Enfoque del método de volúmenes finitos	42
3.1.3	Conservación del Método de Volúmenes Finitos	43
3.1.4	Energía Cinética Turbulenta (TKE).....	43
3.1.5	Volumen de control del deshidratado	44
3.2	Clasificación de los deshidratadores	44
3.3	Flujo de aire dentro de la cámara del deshidratador	47
3.4	Diagrama de Flujo simulación (Autodesk CFD Simulation).....	49
3.5	Diseño y modelado.....	50
3.5.1	Análisis CFD de los parámetros actuales.....	51
3.5.2	Condiciones de frontera y mallado	51
3.5.3	Análisis y validación de resultados	53
3.5.4	Forma de comparación.....	53
3.5.5	Convergencia del diseño	53
3.5.6	Análisis de los planos en el eje X.....	55
3.5.7	Análisis de los planos en el eje Z.....	58
3.5.8	Representación de trazos.....	61
3.5.9	Equilibrio de temperatura en el horno deshidratador.....	61
3.5.10	Conclusiones de la simulación del diseño.....	62
3.6	Rediseño.....	63
3.6.1	Análisis de las aletas del deflector rejilla.....	64
3.6.2	Análisis estructural del deflector rejilla	64
3.6.3	Convergencia del Rediseño.....	67
3.6.4	Análisis de los planos en el eje X.....	68
3.6.5	Análisis de los planos en el eje Z.....	71
3.6.6	Representación de trazos.....	74
3.6.7	Comparación de resultados	74

3.7	Análisis mediante la modelación matemática de la manzana	75
3.7.1	Resultados del modelo matemático.....	78
3.7.2	Utilización de energía en el deshidratado por aire caliente.....	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		82
CONCLUSIONES		82
RECOMENDACIONES		83
BIBLIOGRAFIA		85
ANEXOS		
Anexo N.- 1 Curvas de deshidratado de algunos productos		
Anexo N.- 2 Propiedades organolépticas de los alimentos		
Anexo N.- 3 Tiempo de permanencia de diferentes deshidratadores		
Anexo N.- 4 Fotos deshidratador		
Anexo N.- 5 Productos deshidratados que procesa la empresa Agroapoyo		
Anexo N.- 6 Planos		

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO I

Gráfico N.- 1.1 Condiciones externas del proceso 1.....	3
Gráfico N.- 1.2 Comparación entre temperaturas	6
Gráfico N.- 1.3 Carta Psicrométrica.....	8
Gráfico N.- 1.4 Condiciones internas del sólido húmedo	9
Gráfico N.- 1.5 Características de un sólido no higroscópico de poros capilares.....	10
Gráfico N.- 1.6 Características de un sólido de poros higroscópicos (madera).....	11
Gráfico N.- 1.7 Sólido coloidal no poroso	12
Gráfico N.- 1.8 Curvas de las isotermas de sorción de algunos materiales de diferente higroscopia	14
Gráfico N.- 1.9 Curvas de isotermas de sorción-desorción de un sólido higroscópico	15
Gráfico N.- 1.10 Curva típica de secado de un producto higroscópico en condiciones constantes	15
Gráfico N.- 1.11 Contacto aire-alimento.....	18
Gráfico N.- 1.12 Descripción de una operación de deshidratado por conducción.....	20
Gráfico N.- 1.13 Etapas de un proceso de deshidratación por vaporización	23
Gráfico N.- 1.14 Esquema de un deshidratador de arrastre por lotes	25

CAPÍTULO II

Gráfico N.- 2.1 Pimiento en Cubos	32
Gráfico N.- 2.2 Juntado y aspergeado del pimiento rojo	33

CAPÍTULO III

Gráfico N.- 3.1 Proceso CFD	36
Gráfico N.- 3.2 Comportamiento de un fluido a través del paso por una válvula	38
Gráfico N.- 3.3 Flujo másico que entra y sale de un elemento fluido.....	39
Gráfico N.- 3.4 Vectores de calor de un elemento fluido	41
Gráfico N.- 3.5 Dominio de rejilla estructurada	43
Gráfico N.- 3.6 Volumen de control del deshidratado	44

Gráfico N.- 3.7 Incidencia en la velocidad de deshidratado	47
Gráfico N.- 3.8 Diseño del horno deshidratador	50
Gráfico N.- 3.9 Vista de los componentes del horno deshidratador	50
Gráfico N.- 3.10 Condiciones de frontera.....	51
Gráfico N.- 3.11 Mallado del modelo	52
Gráfico N.- 3.12 Convergencia del modelo	54
Gráfico N.- 3.13 Planos de análisis.....	54
Gráfico N.- 3.14 Representación de trazos diseño.....	61
Gráfico N.- 3.15 Distribución de temperatura en el deshidratador	62
Gráfico N.- 3.16 Diseño del deflector rejilla.....	63
Gráfico N.- 3.17 Ángulo de inclinación de las aletas del deflector (dimensiones en mm)	64
Gráfico N.- 3.18 Diagrama cuerpo libre rejilla	66
Gráfico N.- 3.19 Apoyo del deflector en el deshidratador	67
Gráfico N.- 3.20 Convergencia de iteraciones en el rediseño.....	67
Gráfico N.- 3.21 Representación de trazos rediseño.....	74
Gráfico N.- 3.22 Curvas Relación de humedad (%) vs Tiempo (min) a 1 m/s.....	79
Gráfico N.- 3.23 Curvas Relación de humedad (%) vs Tiempo (min) a 2 m/s.....	79
Gráfico N.- 3.24 Tiempo de deshidratado con 15% de humedad	80
Gráfico N.- 3.25 Tiempo de deshidratado con 18% de humedad	80

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla N.- 1.1 Actividad del agua en algunos alimentos	17
---	----

CAPÍTULO II

Tabla N.- 2.1 Características del horno deshidratador	28
Tabla N.- 2.2 Ingreso al horno deshidratador por lotes de productos	31
Tabla N.- 2.3 Muestra de un lote de pimiento rojo	32

CAPÍTULO III

Tabla N.- 3.1 Clasificación de los deshidratadores	45
Tabla N.- 3.2 Parámetros del aire durante la simulación	52
Tabla N.- 3.3 Comparación de resultados velocidad del aire	74
Tabla N.- 3.4 Comparación de resultados energía cinética turbulenta	75
Tabla N.- 3.5 Resultados estadísticos del modelo de Midilli, sus constantes y coeficientes a diferentes condiciones de deshidratado	77
Tabla N.- 3.6 Energía total de Utilización para velocidad de 1 y 2 m/s	81

GLOSARIO

Adiabático.- Procesos o fenómenos que se realizan sin que exista pérdida o ganancia de calor.

CFD.- (Computational fluid dynamics) Mecánica computacional de fluidos.

Fortran.- (Formula Translating System) Lenguaje de programación de alto nivel de propósito general e imperativo, que está adaptado especialmente al cálculo numérico y a la computación científica.

Higroscopia.- Capacidad de una sustancia para atraer y retener el agua molecular de los alrededores del ambiente.

Histéresis.- Consiste en una curva que muestra la evolución del sistema referida a unos ejes: en el de las abscisas se pone de manifiesto la causa, y en el de las ordenadas el efecto.

Organoléptico.- Propiedades de los cuerpos que se pueden percibir por los sentidos.

RESUMEN

El proceso de deshidratación constituye una parte muy importante en la conservación de productos en la industria alimenticia, conocer los parámetros fundamentales en los que se lleva este proceso, permitirá emitir un criterio evaluativo para mejorar el equipo actual a través de un rediseño de ingeniería. El análisis del sistema de deshidratado del horno para frutos in situ, permitirá conocer su funcionamiento, medir sus variables en el proceso (velocidad del aire y temperatura) y post-proceso (humedad del producto), de las cuales se obtendrán datos para determinar posibles problemas. La utilización de un software para poder predecir el comportamiento del flujo de aire y flujo de calor en la industria mecánica, química, aeroespacial y eléctrica, es posible gracias a las técnicas numéricas aplicadas en ingeniería que han tenido un desarrollo significativo en las últimas décadas. La dinámica computacional de fluidos (o CFD, acrónimo de las palabras en inglés "Computer Fluid Dynamics"), este estudio se centrará en analizar de una forma más precisa el comportamiento del aire y el flujo de calor en la cámara del horno deshidratador mediante una simulación y esta a su vez poder ser comparada con el fenómeno que ocurre experimentalmente. El modelo matemático de la deshidratación de la manzana permitirá evaluar de una manera más real la curva que se obtiene cambiando los diferentes parámetros que lleva consigo el proceso como es la velocidad del aire y la temperatura. A partir de los resultados tanto del análisis experimental como el obtenido mediante CFD, permitirán tomar soluciones y correctivos para lograr mejorar la eficiencia de la energía del horno deshidratador.

ABSTRACT

The drying process constitute an important part in the conservation of products in the food industry, know the basic parameters in which this process is carried, will allow to make an evaluative judgment in order to improve the equipment through engineering's redesign. The analysis of the dehydrated system in a fruits oven on-site, will permit know the functioning, measure their variables in the process (air flow speed and temperature) and post-process (product moisture), of which will obtained data to determinate potential problems. The use of a software to predict the performance of the air flow and heat flow in the mechanical industry, chemical, aerospace and electric, is possible by the numeric technics applied in engineering who have had a significant development over the last decades. The CFD (Computer Fluid Dynamics), this study will focus analyze in a more precise way, the performance of the air and heat flow in the dehydrator oven chamber through a simulation and this in turn can be compared with the phenomenon which occurs experimentally. The mathematical model of the dehydration of the apple will permit evaluate in a more real way the curve that is obtained by changing the different parameters that involves the process as the air flow speed and the temperature. Starting from the analysis of experimental results and the results by CFD, will take solutions and corrections to achieve a better energy efficiency of the dehydrator oven.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

Introducción

La deshidratación es una de las técnicas más antiguas en la conservación de los alimentos, y posiblemente una de las más empleadas; en nuestro país, la industria de la deshidratación de alimentos está creciendo, muchos de estos productos son de exportación ya que regionalmente no hay la cultura para el consumo de estos alimentos ya que Ecuador se encuentra en una zona privilegiada donde se puede gozar del consumo de alimentos frescos a diario.

Se definirán conceptos y fundamentos básicos sobre la deshidratación por horno de bandejas para tener un amplio panorama en el desarrollo de los capítulos posteriores; de esta manera se conocerán parámetros físicos y químicos en los cuales actúa el deshidratado de alimentos, condiciones ambientales dentro del horno de deshidratado, aplicación de características y propiedades del aire y su interacción en la deshidratación.

La deshidratación lleva consigo varios procesos termodinámicos, de transferencia de calor y mecánica de fluidos, estos procesos convergen en el horno deshidratador, como por ejemplo un proceso adiabático, la convección y la velocidad del aire actúan para poder eliminar efectivamente la mayor cantidad de agua contenida en el alimento.

1.1 Deshidratado de alimentos

La deshidratación es un proceso donde se remueve térmicamente sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido seco, esta se basa en un sistema de estabilización del alimento por medio de la reducción de la actividad de agua (a_w) para de esta forma ralentizar los procesos donde el alimento se ve alterado por microorganismos y reacciones propias de la comida por efectos de su contenido de agua.

Existen dos procesos que ocurren cuando un sólido húmedo es sometido a la deshidratación:

1. Transferencia de energía (principalmente como calor) del ambiente circundante para evaporar la humedad superficial.
2. Transferencia de la humedad interna a la superficie del sólido y esto lleva posteriormente a la evaporación producida en el proceso 1.

La tasa de deshidratado que se logra depende de la velocidad en que los dos procesos ocurren. La transferencia de energía calorífica del ambiente circundante al sólido húmedo puede ocurrir como resultado de la convección, conducción o radiación y en algunos casos es el resultado de una combinación de estos efectos.(MUJUMDAR, 1995, p. 1)

Los alimentos que son productos de la deshidratación contienen entre el 8% al 15% de humedad, este porcentaje depende mucho del tipo producto deshidratado, ya que muchas veces se deja en un porcentaje apropiado para que no ocurran las reacciones enzimáticas en el alimento y al mismo tiempo no pierda sus propiedades nutricionales.

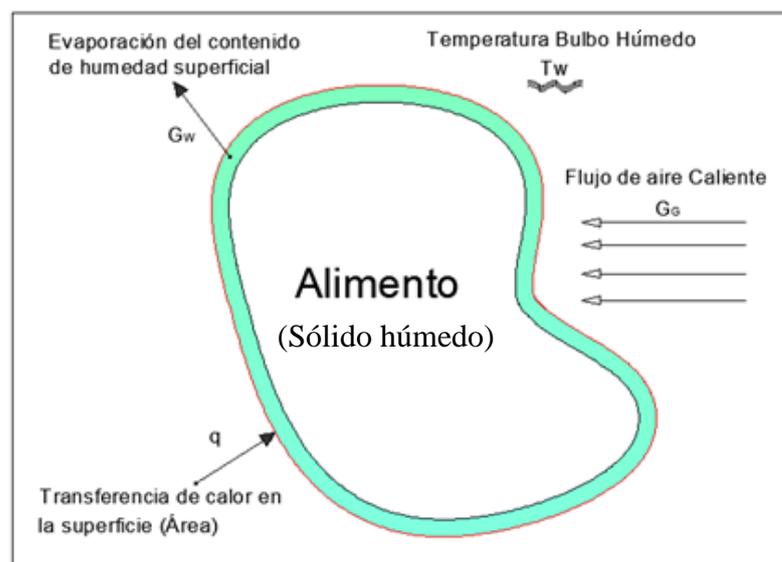
La utilización del término deshidratación es debido a que el proceso no solo extrae el agua que actúa como disolvente en algún alimento sino que retira el agua que entra en la constitución de las estructuras y tejidos del alimento, esto da como resultado

cambios drásticos en algunas cualidades de los alimentos como las organolépticas, esto quiere decir que cambian sus características físicas perceptibles por los sentidos como el sabor, textura, olor y color.

1.2 Condiciones Externas (Proceso 1)

Las variables externas que acompañan en el proceso 1 a la deshidratación son: temperatura, humedad, la velocidad y la dirección del flujo del aire, la forma física del sólido, la posibilidad o conveniencia de agitación, y el método de apoyo del sólido; estas condiciones son importantes en la parte inicial del deshidratado donde se va a remover el agua libre del alimento contenido en forma de humedad en la superficie, como se puede apreciar en el gráfico N.- 1.1

Gráfico N.- 1.1 Condiciones externas del proceso 1



Elaborado por: Hugo Muñoz

La evaporación del agua de la superficie está controlada por la difusión del vapor desde la superficie del sólido a la atmósfera circundante a través de un filtro fino de aire en contacto con la superficie.

Además, dado que la transferencia de masa es acompañada generalmente con la transferencia simultánea de calor, esta consideración debe darse a las características de entalpía.

1.2.1 El aire

El aire al ser uno de los elementos existentes más abundante, es una mezcla de varios gases, cuya composición varía ligeramente en función de la posición geográfica y latitud, tiene características que se utilizan en procesos industriales por su fácil manejo y porque obtenerlo es muy sencillo.

El aire, no puede ser considerado como un vapor saturado que está cercano a temperaturas donde pueda ser condensado, ya que se considera como un gas altamente sobrecalentado o precisamente una mezcla de gases altamente sobrecalentados.

Se pueden modificar las condiciones ambientales del aire como la temperatura, la presión, pero estas no cambian significativamente sus propiedades ya que los pequeños cambios que se realicen solo causaran pequeños cambios en su volumen y densidad.

1.2.2 Humedad Relativa

Es la proporción entre la cantidad real de humedad en el aire y la cantidad máxima de aire húmedo que puede contenerse a esa temperatura.

Entonces:

$$\phi = \frac{P_w}{P_s} * 100 \qquad \text{Ecuación 1.1}$$

Dónde: ϕ = Es la relación molar del vapor de agua existente en una determinada muestra de aire húmedo.

P_w = es la densidad del vapor de agua en el aire [kg/m³]

P_s = es la densidad del vapor de agua saturada a la temperatura de
bulbo seco del aire [kg/m³]

1.2.3 Humedad Absoluta

Es la cantidad real de vapor de agua contenido en 1 kg de aire seco, esta se expresa en gramos de agua por kilogramo de aire.

1.2.4 Temperatura de bulbo seco (T_G)

Es la medición de una temperatura seca, es decir en esta no intervienen factores del ambiente como el movimiento del aire, la humedad o la radiación.

1.2.5 Temperatura de bulbo húmedo (T_W)

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura constante alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de mezcla gas-vapor no saturado que se mueve muy rápidamente.

Esta temperatura también llamada temperatura húmeda, es una forma de medir el calor en un sistema donde interactúan dos gases pudiendo ser estos el aire y el vapor de agua. Se mide un termómetro cuyo bulbo está rodeado de un medio poroso que se mantiene totalmente mojado cuando se lo pone en contacto con una corriente gaseosa.

La transferencia de calor hacia la mecha del termómetro puede ser descrita bajo la siguiente ecuación:

$$q = (h_C + h_R)A(T_G + T_W) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Dónde:

q = Flujo de Calor	[W/m ²]
h_C = Coeficiente de transferencia de calor por convección	[W/(m ² .K)]
h_R = Coeficiente de transferencia de calor por radiación	[W/(m ² .K)]
T_G = Temperatura bulbo seco	[K]
T_W = Temperatura bulbo húmedo	[K]
A = Área de transferencia de calor	[m ²]

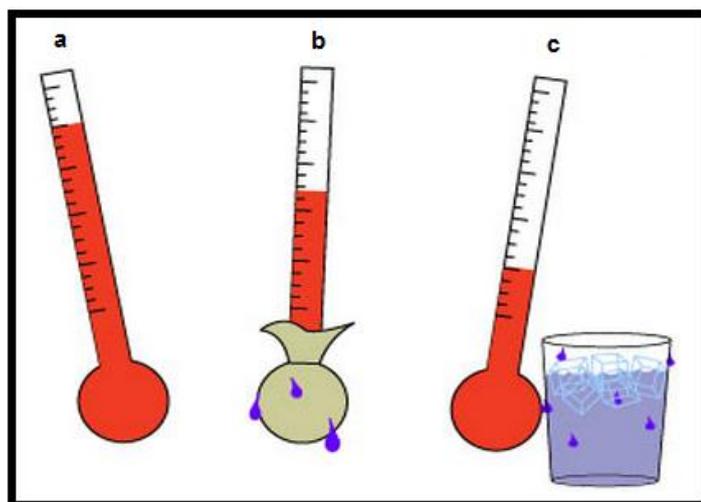
1.2.6 Punto de rocío

El concepto de punto de rocío se da cuando una mezcla aire-vapor se enfría a presión y relación de humedad constante, alcanza una temperatura en que la mezcla se satura y por debajo de la cual se produce condensación de la humedad.

En el gráfico N.- 1.2 se observa la diferencia entre las distintas temperaturas que se pueden tomar a temperatura ambiente donde:

Bulbo seco (a), temperatura de bulbo húmedo (b) y temperatura de punto de rocío (c).

Gráfico N.- 1.2 Comparación entre temperaturas



Fuente: http://www.idalex.com/technology/how_it_works.htm

1.2.7 Volumen específico del aire seco

El volumen específico del aire seco puede calcularse a partir de las leyes de los gases ideales.

Entonces:

$$V'_a = \frac{R_a T_a}{p_a} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

V'_a = Volumen específico del aire seco [m³/kg]

R_a = La constante de los gases [m³.Pa/Kg.K]

T_a = Temperatura absoluta [K]

p_a = Presión parcial del aire seco [kPa]

1.2.8 Mezcla Gas-Vapor

Cuando un gas o restos gaseosos están en contacto con una superficie líquida, este adquirirá vapor del líquido hasta la presión parcial del vapor en la mezcla de gas que es igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura existente.

El aire húmedo es una mezcla de vapor de agua y gas, compuesta de una masa m_w de agua y una masa m_g de gas (aire). La humedad absoluta puede ser expresada como:

$$Y = \frac{m_w}{m_g} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

1.2.9 Psicometría

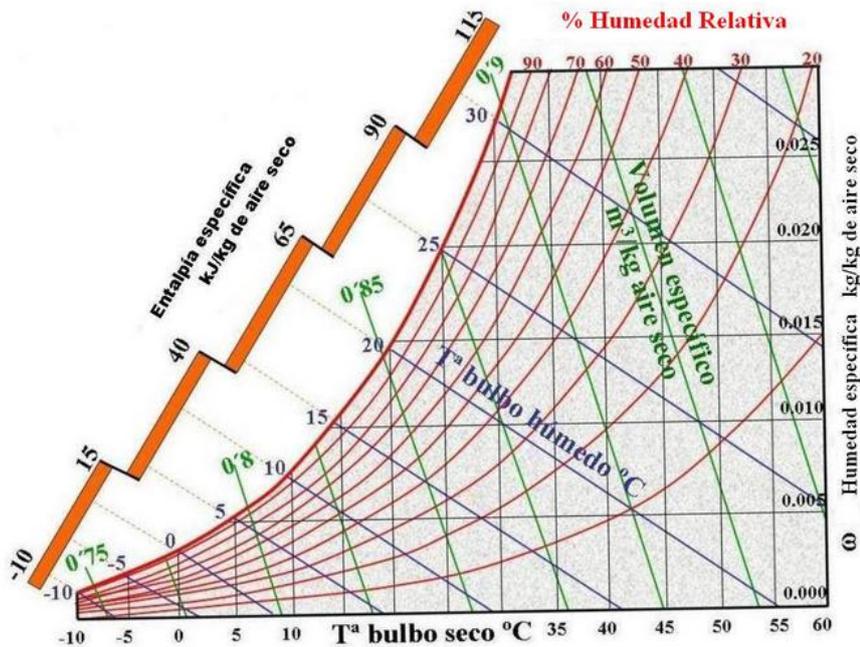
La psicometría tiene el objeto de determinar las propiedades termodinámicas de mezclas gas-vapor, entre sus aplicaciones más comunes están los sistemas de aire-vapor de agua.

Para llevar a cabo la determinación de estas propiedades, la psicometría estudia las características del aire mencionadas anteriormente en este capítulo.

1.2.9.1 La carta Psicométrica

El aire es una mezcla de gases que se encuentra compuesta principalmente por un 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y el resto, otra serie de componentes entre los que se encuentra el vapor de agua; un modo de determinar las propiedades del aire es mediante la utilización de la carta psicométrica indicada en el gráfico N.- 1.3, su utilización está representada para cada presión barométrica.

Gráfico N.- 1.3 Carta Psicométrica



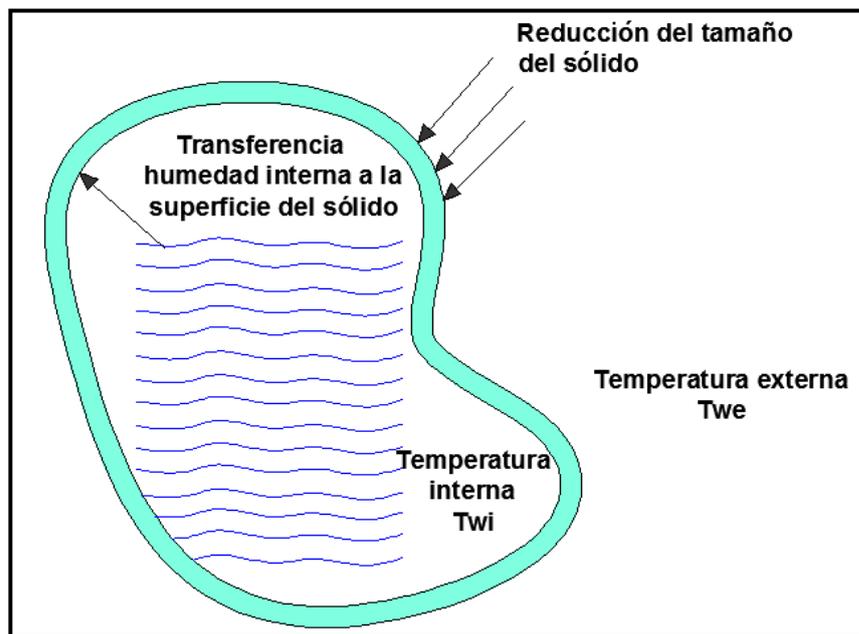
Fuente: http://ocw.upm.es/produccion-animal/produccion-avicola/contenidos/TEMA_3/3-2-condiciones-ambientales-ta-y-hr

La carta psicrométrica es un diagrama de doble entrada, en el que se relacionan múltiples parámetros referentes a una mezcla de aire húmedo: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, punto de rocío, entalpía específica o calor total, calor sensible, calor latente y volumen específico del aire.

1.3 Condiciones Internas (Proceso 2)

Como resultado de la transferencia de calor a un sólido húmedo, se desarrolla un gradiente de temperatura dentro del sólido, mientras que se produce la evaporación de humedad desde la superficie. Esto produce una migración desde el interior del sólido hacia la superficie, que se origina a través de uno o más mecanismos, como la difusión, el flujo capilar y las presiones internas creadas por la contracción durante el secado, esto se muestra en el gráfico N.- 1.4

Gráfico N.- 1.4 Condiciones internas del sólido húmedo



Elaborado por: Hugo Muñoz

1.3.1 Contenido de humedad en los sólidos

Un sólido húmedo expuesto a un suministro continuo de gas fresco continúa perdiendo humedad hasta que la presión de vapor de la humedad en el sólido es igual a la presión parcial del vapor en el aire.

El contenido de humedad en el sólido podría reducirse aún más mediante su exposición al aire de humedad relativa más baja.

Los sólidos por su contenido de humedad pueden ser clasificados en:

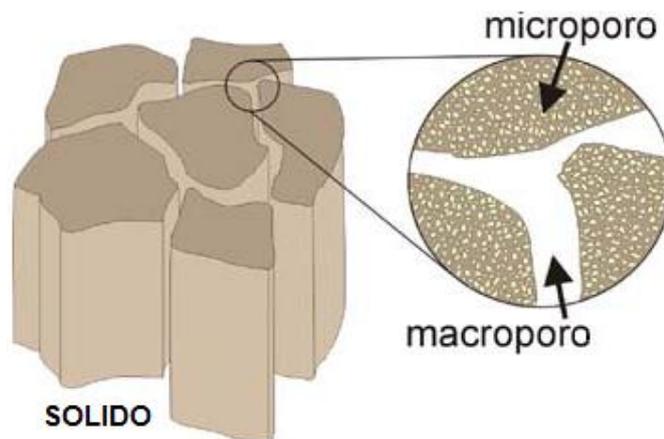
- No higroscópicos de poros capilares
- Poros higroscópicos
- Coloidales (no poroso)

Los sólidos no higroscópicos de poros capilares se caracterizan por:

- Hay un espacio poroso claramente reconocible
- La cantidad de agua física ligada es insignificante
- El medio no se encoge durante el secado

Ejemplo de estos sólidos son la arena, minerales triturados, partículas poliméricas y algunos cerámicos, sus características se muestran en el gráfico N.- 1.5.

Gráfico N.- 1.5 Características de un sólido no higroscópico de poros capilares



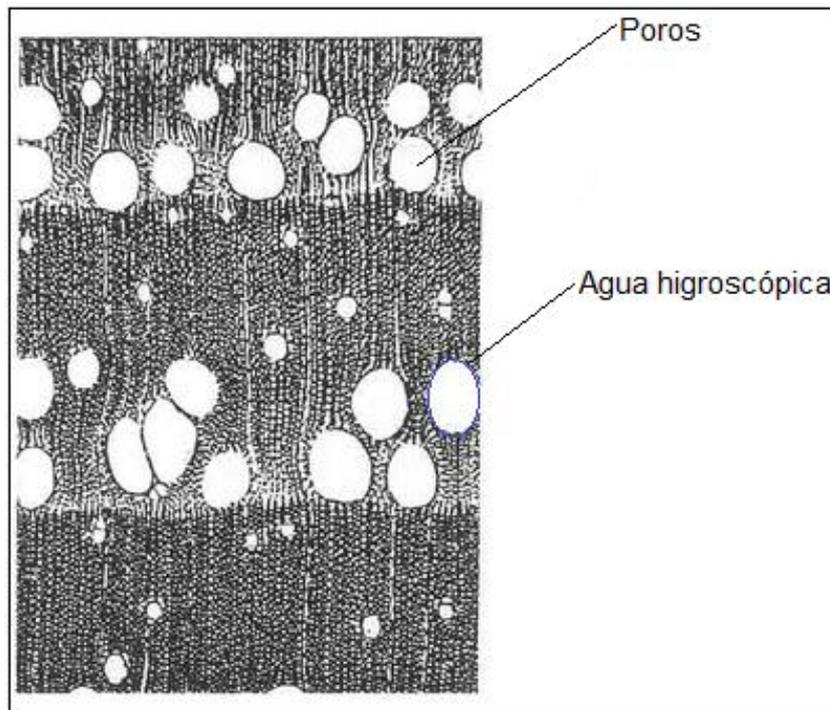
Fuente: <http://www.landfood.ubc.ca/soil200/images/16images/16.1.1macroµpores.jpg>

Los sólidos de poros higroscópicos se caracterizan por:

- Hay un espacio poroso claramente reconocible
- Hay una gran cantidad de agua ligada
- El encogimiento se produce en las primeras etapas del secado

Ejemplo de este tipo de sólidos es la arcilla, tamices moleculares, madera y los textiles, sus características se muestran en el gráfico N.- 1.6.

Gráfico N.- 1.6 Características de un sólido de poros higroscópicos (madera)



Fuente: <http://woodlandsteward.squarespace.com/storage/past-issues/WATERANDCHEMICAL.htm>

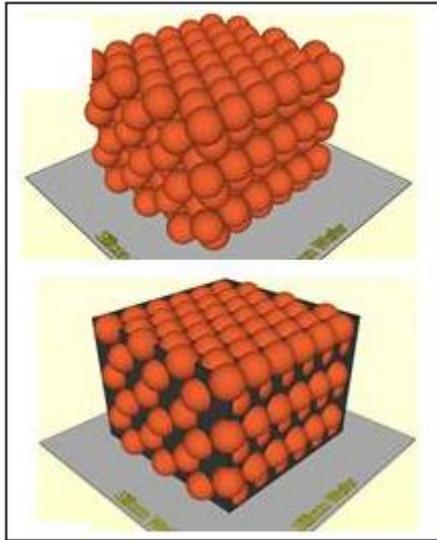
Los sólidos coloidales no porosos se caracterizan por:

- No hay espacio para los poros (la evaporación se da solamente en la superficie)
- Todo el líquido está físicamente ligado

Algunos ejemplos de este tipo de sólidos son el jabón, el pegamento, algunos polímeros como el nylon y varios productos alimenticios.

El líquido contenido está ligado a la estructura del sólido como se muestra en el gráfico N.- 1.7

Gráfico N.- 1.7 Sólido coloidal no poroso



Fuente: http://acswebcontent.acs.org/prfar/2011/images/Paper_11565_abstract_15745_0.jpg

El contenido de humedad de un sólido generalmente se expresa como el contenido de humedad en peso de material de hueso seco en el sólido, X . A veces el contenido de humedad W , el cual es la relación humedad-sólido basado en la masa total del material húmedo, es empleado. Los dos contenidos de humedad están relacionadas por la expresión.

$$X = \frac{W}{1-W} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

El agua puede estar ligada al sólido de varias maneras, por retención en los capilares, por solución en las estructuras celulares, como solución con el sólido o como adsorción química o física sobre la superficie del sólido.

La humedad libre contenida en un sólido, es la humedad que puede ser extraída a una temperatura dada y puede incluir a al agua ligada y libre.

En las proximidades de la interfaz entre el agua libre y el vapor, la presión de vapor en equilibrio es la presión de vapor saturado. Productos muy húmedos tienen una presión de vapor en la interfaz casi igual a la presión de vapor de saturación. Si la concentración de sólidos se incrementa por la eliminación de agua, a continuación, los sólidos higroscópicos disueltos producen caída en la presión de vapor debido a las fuerzas osmóticas.

Además la eliminación de agua se traduce finalmente en la superficie del producto que se está secando.

El agua ahora sólo existe en el interior de capilaridades muy pequeñas, entre partículas pequeñas, entre moléculas grandes, y unido a las propias moléculas. Esta unión produce una disminución considerable de la presión de vapor. Por tanto, tal producto puede estar en equilibrio sólo con un ambiente externo en el cual la presión de vapor se reduce considerablemente.

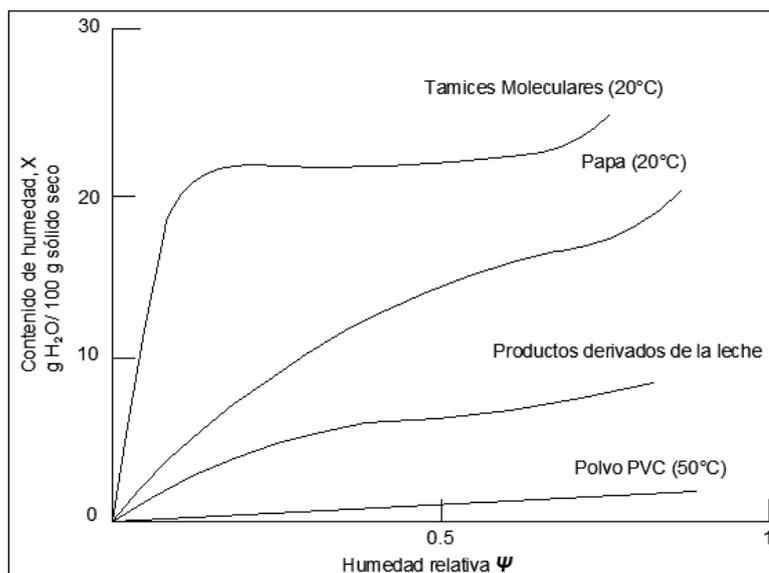
1.3.2 Isoterma de adsorción (sorción)

Un producto puede ser llamado higroscópico si es capaz de atrapar agua con la reducción simultánea de la presión de vapor.

Muchos productos pueden variar sus propiedades higroscópicas extensamente, la razón por la cual ocurre esto es su estructura molecular, su solubilidad y la extensión de la superficie reactiva como se puede apreciar en el gráfico N.- 1.8

La isoterma de adsorción de humedad permite conocer el contenido de humedad de equilibrio de un alimento que se halla expuesto a un ambiente de humedad relativa y temperatura conocidas.

Gráfico N.- 1.8 Curvas de las isothermas de sorción de algunos materiales de diferente higroscopia



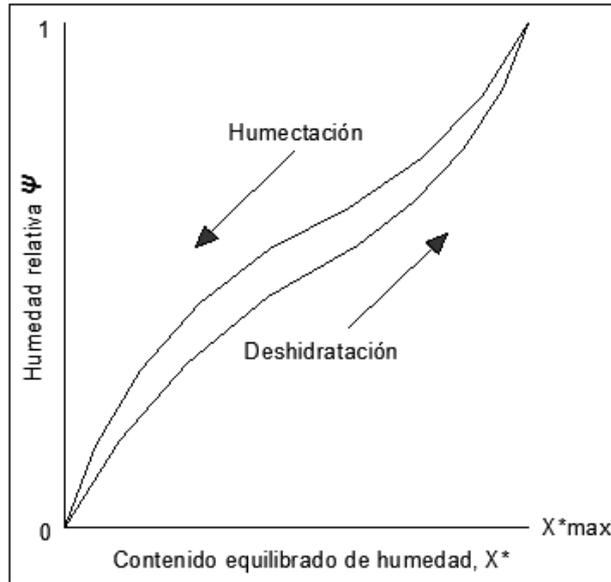
Fuente: Mujumdar pág. 16

1.3.3 Histéresis adsorción-desorción

El contenido de humedad en equilibrio de un producto puede ser diferente dependiendo si el producto se humedece (sorción) o se deshidrata (desorción). Estas diferencias se observan de diversos grados en casi todos los productos higroscópicos.

La observación de las isothermas de adsorción-desorción permiten evaluar fenómenos de histéresis y por lo tanto la porosidad del sólido. Como se puede observar en el gráfico N.- 1.9, la isoterma de adsorción no coincide con la isoterma de desorción para el intervalo de medias y altas presiones relativas, por lo cual se observa un fenómeno de histéresis.

Gráfico N.- 1.9 Curvas de isotermas de sorción-desorción de un sólido higroscópico

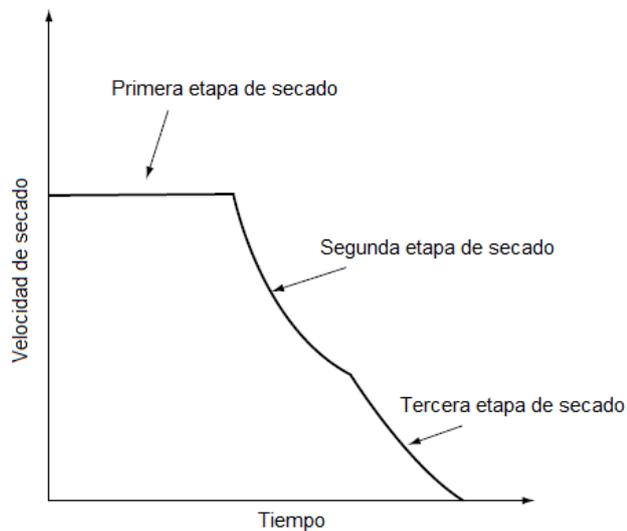


Fuente: Mujumdar pág. 17

1.3.4 La curva de secado

La curva de secado muestra las etapas que tiene un producto al momento de someterse al proceso de la deshidratación, estas varían dependiendo el tipo de producto, y el tipo de método que se utilice.

Gráfico N.- 1.10 Curva típica de secado de un producto higroscópico en condiciones constantes



Fuente: Mujumdar pág. 21

El gráfico N.- 1.10 muestra una curva típica de secado donde se pueden diferenciar claramente 3 etapas: en la primera etapa de secado se observa que el producto se seca a velocidad constante por el contenido de agua libre en la superficie del alimento, la velocidad de secado decrece en la segunda etapa debido a que el agua contenida en el producto debe transportarse desde el interior por difusión o capilaridad hasta la superficie del alimento y por último en la tercera etapa la velocidad de secado disminuye hasta llegar a cero, en esta etapa se puede observar la reducción o encogimiento del producto.

En el anexo N.- 1 se muestran las diferentes curvas de deshidratado que se obtienen a partir de modelos matemáticos y de experimentación en diferentes productos.

1.3.5 Actividad de agua en los alimentos

La actividad de agua (a_w) por sus siglas en inglés, es la cantidad de agua libre contenida en el alimento y que es la responsable de la proliferación de microorganismos y de reacciones enzimáticas.

La actividad de agua es una medida de que eficiente puede ser el agua para participar de una reacción química (física). Si la mitad del agua está tan fuertemente ligada a una molécula de proteína esta no puede participar en una reacción de hidrólisis por lo que la actividad de agua total será reducida. (OHIO UNIVERSITY, 2000)

La actividad de agua (a_w) se define como:

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde a_w = actividad del agua

p = la presión de vapor de agua en la sustancia

p_0 = la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

El valor que se les asigna a los alimentos por el contenido de actividad de agua va desde 1 cuando se tienen la mayor cantidad de agua libre en el alimento, y 0 cuando no se producen reacciones enzimáticas ni existe crecimiento de microorganismos.

Tabla N.- 1.1 Actividad del agua en algunos alimentos

1-0,95	Frutas frescas, carne, leche
0,95-0,9	Queso
0,9-0,85	Margarina
0,85-0,8	Carnes Saladas
0,8-0,75	Mermeladas
0,75-0,65	Nueces
0,65-0,60	Miel
0,5	Pasta
0,3	Galletas
0,2	Vegetales secos,

Fuente: OHIO UNIVERSITY

1.4 Propiedades organolépticas

Estas propiedades son características físicas que tiene la materia y son perceptibles a los sentidos, estas en el proceso de deshidratación pueden llegar a variar drásticamente, y las principales son el sabor, el olor, la textura y el color.

En el anexo N.- 2 se encontrarán propiedades organolépticas de algunos alimentos.

1.5 Transferencia de Calor (Métodos de calentamiento)

Siempre que existe un gradiente de temperatura en un sistema, o siempre que dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto, se transfiere energía. El proceso mediante el cual se transporta esa energía se conoce como transferencia de calor, donde lo que se transfiere recibe el nombre de calor y no puede medirse u

observarse de manera directa, pero si los efectos que produce. El flujo de calor, al igual que la realización de trabajo, es un proceso mediante el cual se modifica la energía inicial de un sistema.(KREITH/BOHN, 2001)

En la deshidratación no se pretende cocinar el alimento, las temperaturas en las que el proceso trabaja son menores a la temperatura de ebullición o posiblemente se llegue a esta momentáneamente.

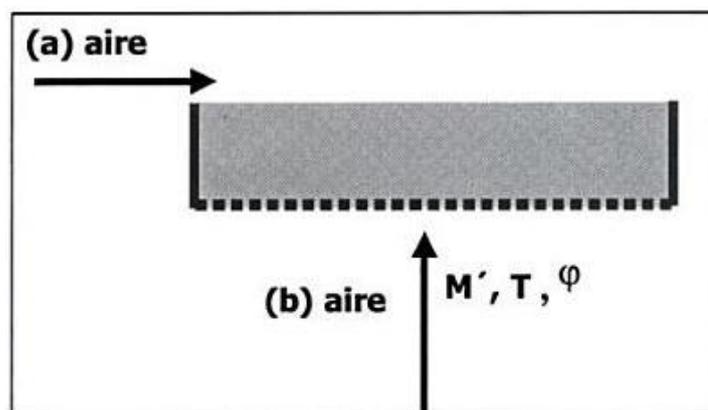
1.5.1 Convección

La convección es uno de los métodos más comunes en el secado de una partícula en forma de lámina. El calor es suministrado por medio del aire caliente que circula sobre la superficie del sólido, este aire caliente evapora el contenido de agua superficial del producto y la recircula hasta cuando sea apropiado retirar el aire con contenido de humedad.(MUJUMDAR, 1995, p. 26)

En el gráfico N.- 1.11 se observa los parámetros del contacto alimento-aire:

En paralelo (a) y a través (b), siendo M el caudal de aire seco, T la temperatura del aire y φ la humedad relativa, en tanto por uno, del mismo.

Gráfico N.- 1.11 Contacto aire-alimento



Fuente: (MAUPOEY, GRAU, & BAVIERA, 2001, p. 26)

Mientras más rápida sea la velocidad a la que circula el líquido o el gas, más rápido se producirá la transferencia de calor, esto normalmente se produce mediante ventiladores; a este tipo de transferencia de calor se lo denomina convección forzada.

La transferencia de calor por convección se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \qquad \text{Ecuación 1.7}$$

Dónde:

Q = Calor transferido de la superficie al fluido circundante. [W]

A = Área de la superficie. [m²]

T_s = Temperatura de la superficie. [°C]

T_∞ = Temperatura del fluido circundante. [°C]

h = Coeficiente convectivo de transferencia de calor. [W/m²°K]

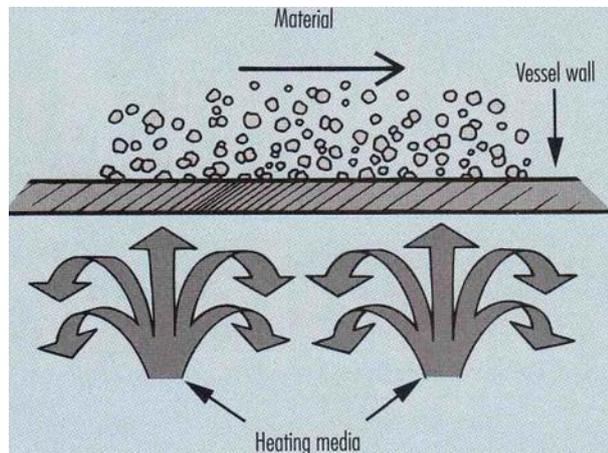
1.5.2 Conducción

Los métodos de transferencia de calor por conducción son más apropiados para productos delgados o sólidos muy húmedos.

El calor suministrado para que se produzca la evaporación es a través de superficies calientes en contacto con el sólido (estacionario o en movimiento), donde la humedad evaporada es retirada por un proceso de succión o al vacío o también mediante una corriente de gas portadora de esta humedad. (MUJUMDAR, 1995, p. 26)

En el gráfico N.- 1.12 se observa el calentamiento de una lámina delgada, eliminando humedad a través de la transferencia de calor por conducción.

Gráfico N.- 1.12 Descripción de una operación de deshidratado por conducción



Fuente: <http://info.heylpatterson.com/blog/bid/108836/Understanding-How-a-Conduction-Dryer-Works>

La conducción está definida en la siguiente ecuación:

$$q = UA(t_k - t_m) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde:

U: es el coeficiente global de transferencia de calor [kcal/seg*°K*m²]

A: es el área de calentamiento en contacto con el producto [m²]

t_k: es la temperatura de la fuente de calor [°K]

t_m: es la temperatura del producto [°K]

En el anexo N.- 3 se podrán encontrar los tiempos de deshidratado en diferentes equipos por convección y conducción.

1.5.3 Aislamiento de Calor

En los equipos de deshidratación grandes u hornos deshidratadores funcionan con temperaturas altas, pero por debajo de los 100 °C, dando como resultado un gran potencial para la pérdida de calor por convección, por lo tanto el aislamiento térmico dentro de un horno deshidratador es vital para garantizar la eficiencia energética.

1.6 Métodos de deshidratado

En la actualidad existen varios métodos de deshidratado de alimentos, estos van desde el tipo de energía que utilizan, la forma de transferir la energía, de remover la humedad, etc., que hacen que los alimentos productos de la deshidratación tengan propiedades organolépticas únicas dependiendo el tipo de método.

En el presente estudio se mencionarán los métodos que utilizan la evaporación de la humedad por medio de transferencia de calor y estos son:

- Deshidratado por evaporación (ebullición)
- Deshidratado por arrastre

1.6.1 Deshidratado por evaporación

En el deshidratado por evaporación se hace calentar el alimento lo suficiente para que el agua que contiene llegue al punto de ebullición, dado esto, el agua abandona el alimento al cambiar de estado líquido a vapor. Bajo ciertas circunstancias la temperatura tiene que elevarse más para que se produzca esta evaporación.

1.6.1.1 Fundamento del deshidratado por evaporación

Cuando se disuelven solutos en el agua, la presión de vapor de la solución resultante es menor a la del agua pura, esto conduce a que su punto de ebullición sea más elevado al del agua pura a una misma presión barométrica.(TECANTE, 2010, p. 8)

La descripción cuantitativa de este fenómeno está dado por la Ley de Raoult:

“La presión de vapor de un componente en una solución es igual a la fracción mol de aquél componente por su presión de vapor cuando está puro”.

La cantidad de energía en forma de calor que se requiere para evaporar el agua está determinada por el calor latente de evaporación.

Existen diferentes mecanismos de transferencia de calor para el secado por evaporación:

- Conducción, entre una superficie caliente que está en contacto directo con el alimento.
- Convección, entre el alimento y un medio de calentamiento como vapor de agua sobrecalentado.
- Radiación, cuando existe generación interna de calor en el alimento debido a la exposición de éste a rayos infrarrojos, microondas o calentamiento dieléctrico.

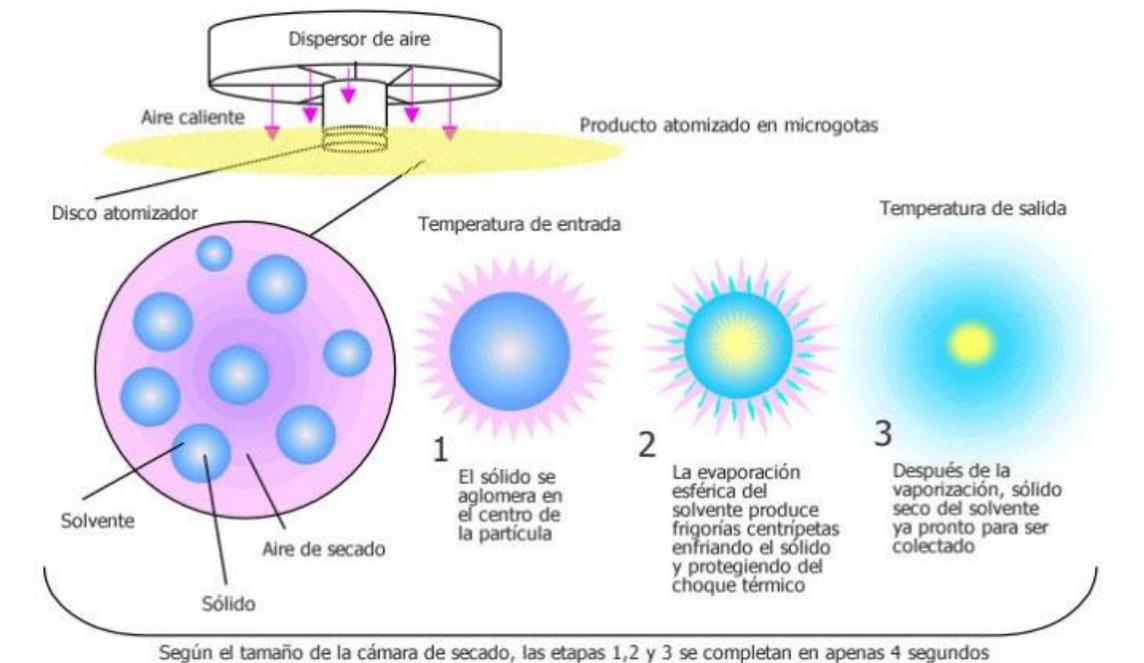
Para cada uno de estos casos es necesario llevar al alimento a la temperatura de ebullición del agua.

La utilización de este método es muy violento dado que el deshidratado a menudo se realiza con la etapa de cocinado del alimento. El requerimiento energético

aproximadamente es 500 Kcal/kg solo para el calor latente de agua evaporada.(ITESCAM, p. 3)

Se utiliza la deshidratación por vaporización para productos como la leche en polvo, cereales en hojuelas, pasta, gel, polvos como la cocoa y algunos granos, el proceso de este tipo de deshidratado se puede observar en el gráfico N.- 1.13.

Gráfico N.- 1.13 Etapas de un proceso de deshidratación por vaporización



Fuente: www.sprayprocess.com.br/espanhol/secado-por-atomizacion.asp

1.6.2 Deshidratado por arrastre

Se entiende por deshidratado de arrastre, a la retirada de agua por medio del contacto del alimento con aire relativamente seco, este aire seco se renueva cada cierto tiempo para que el secado prosiga hasta el estado de deshidratado deseado.

1.6.2.1 Fundamento del deshidratado por arrastre.

Cuando se tiene humedad relativamente controlada, el aire resulta más seco cuando se aumenta la temperatura, por lo general el deshidratado de arrastre se lo realiza con un chorro de aire caliente.

En el exterior del alimento húmedo cuando este se pone en contacto con una corriente de aire suficientemente caliente y seco, se establece espontáneamente entre ellos una diferencia de temperatura y una diferencia de presión parcial del agua dando como resultado la transferencia simultánea de calor y masa entre el aire y el alimento.(TECANTE, 2010, p. 11)

El mayor contenido de humedad en el alimento hace que la presión parcial de agua en él sea mayor que en el aire dando como resultado la transferencia de masa desde el alimento hacia el aire.

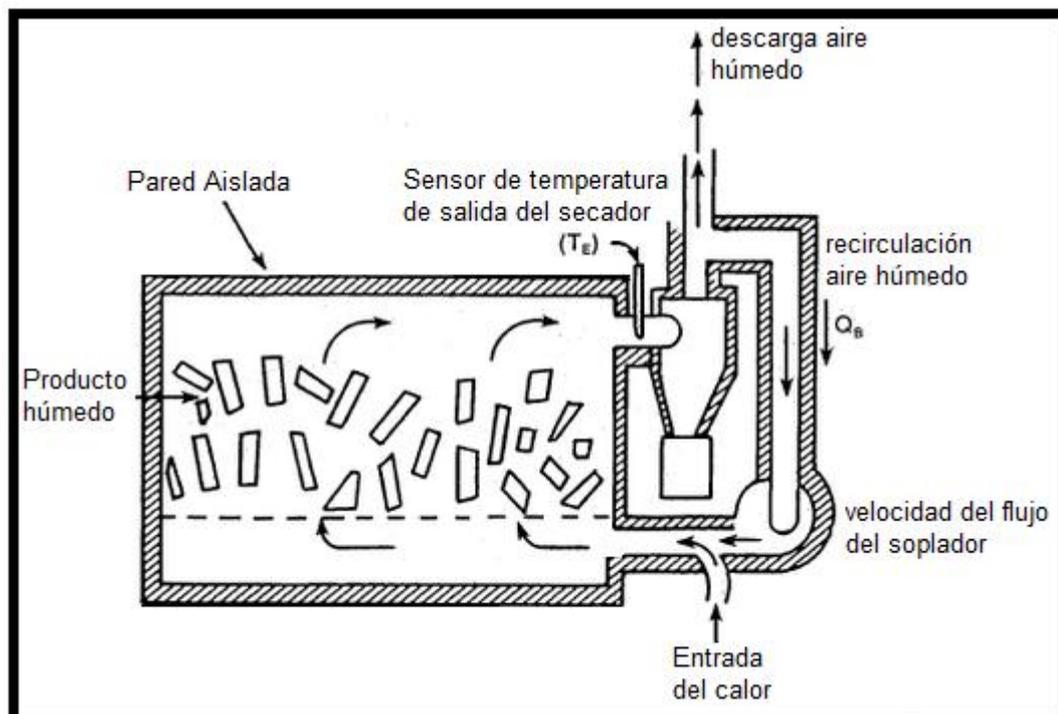
El aire en ambos caso se comporta como un fluido de calentamiento y medio de arrastre del agua evaporada del alimento.

En el interior del alimento conforme este va perdiendo humedad se establece en su interior diferencias de concentración dando como resultado la transferencia de humedad hacia su superficie mediante convección (entre la superficie del alimento y corriente de aire) y difusión (desde el interior del alimento hacia su superficie).

El requerimiento energético de la operación aproximadamente será de 600 Kcal/kg de agua evaporada. La energía que el sistema consume para que esta agua pueda ser evaporada se da por el aire seco y caliente.(ITESCAM, s/f, p. 3)

Cuando el aire caliente aporta todo su calor necesario para la evaporación, se tiene un deshidratador adiabático, dado esta condición esencial para el diseño.

Gráfico N.- 1.14 Esquema de un deshidratador de arrastre por lotes



Fuente: http://knowledgepublications.com/hydrogen/hydrogen_generator_gas_vol_3_4_detail.htm

En el gráfico N.- 1.14 se puede observar un diseño básico de un deshidratador por arrastre, estos son ampliamente utilizados gracias a su versatilidad y la gran gama de productos que pueden ser deshidratados como por ejemplo la mayoría de legumbres, frutas y hortalizas.

CAPÍTULO II

PARÁMETROS DEL EQUIPO DESHIDRATADOR Y DEL PROCESO

Introducción

El deshidratador por lotes también conocido como horno deshidratador de bandejas, es uno de los equipos más empleados a nivel de la microempresa, son utilizados donde la velocidad de alimentación es baja (<100 kg / h) y su campo de aplicación es muy extenso debido a que se puede deshidratar una amplia gama de productos, constituyéndose principalmente frutas y hortalizas.

El deshidratador a estudiar es de tipo convectivo, se estima que el 85% de los secadores industriales son de este tipo, su eficiencia térmica es relativamente baja debido a la dificultad en la recuperación del calor latente de vaporización contenida en el aire.

En este capítulo se analizarán todas las características que tiene el horno deshidratador, su forma de funcionamiento y el proceso de cómo se está llevando la deshidratación.

2.1 Características técnicas del deshidratador por lotes

En un deshidratador por lotes, el producto húmedo es colocado en delgadas bandejas por lo general de acero inoxidable, estas son ubicadas en un coche que contiene cierta cantidad de bandejas una sobre otra con una distancia apropiada entre bandejas.

El coche con las bandejas entra al horno deshidratador, en el cual un ventilador es accionado y se enciende el calentador.

El deshidratado por lotes está definido bajo la siguiente ecuación: (MUJUMDAR, 2006, p. 71)

$$W_D = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{d\tau} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

El aire y la humedad comienzan a cambiar dentro del deshidratador, de igual manera el contenido de humedad y la temperatura del producto sólido.

La ecuación para el modelo descrito es:

$$m_s \frac{dX}{d\tau} = -W_D A \quad \text{Ecuación 2.2}$$

2.2 Características específicas del deshidratador

El deshidratador se encuentra en la empresa Agroapoyo, ubicada en el km. 1,5 vía Puembo, fue construido por los mismos dueños de la empresa con la colaboración de técnicos mecánicos.

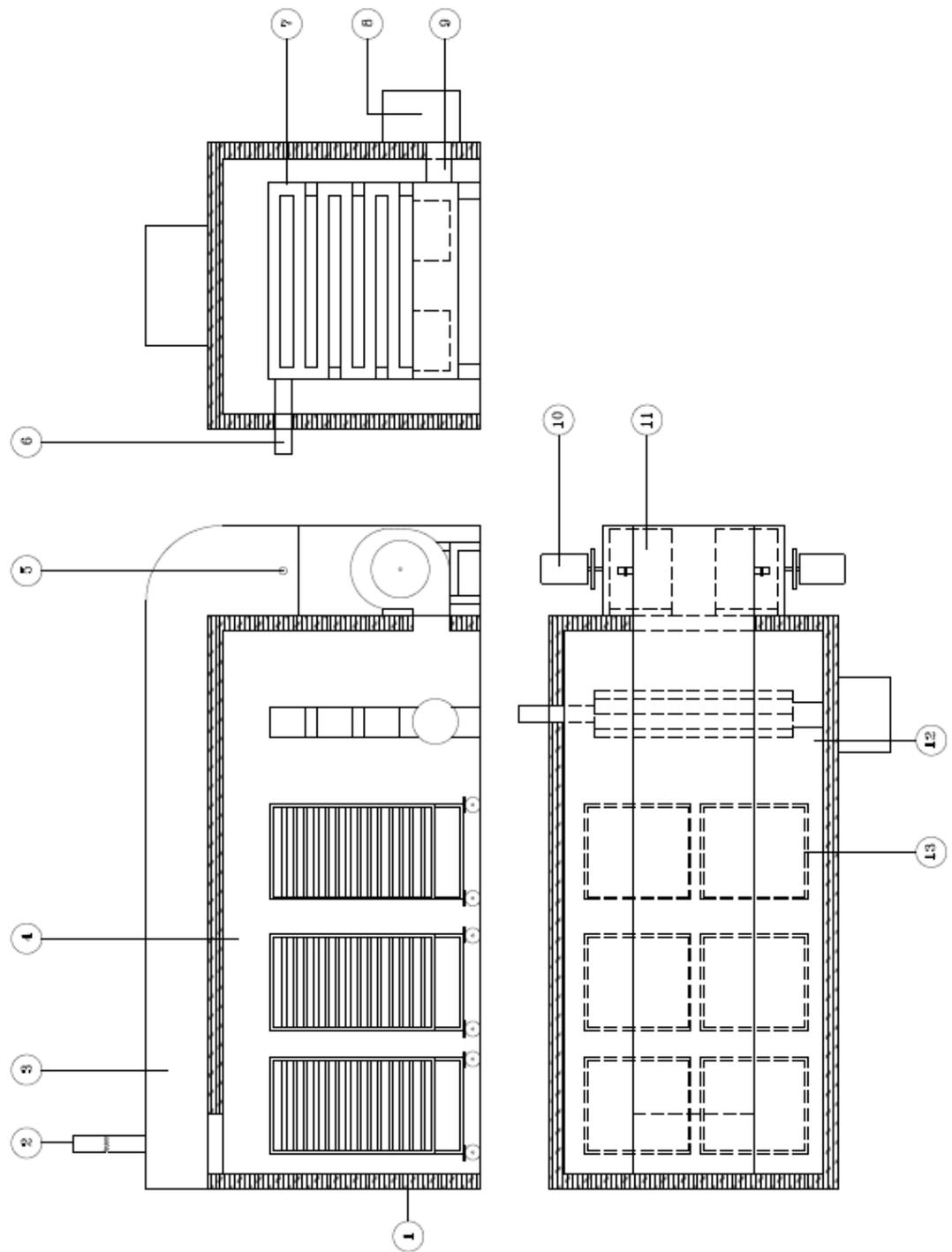
En la tabla N.- 2.1 y en el diagrama del horno se aprecia todas las características que tiene el equipo, datos de operación y especificaciones de cada parte.

En el anexo N.- 4 se puede observar las condiciones actuales del deshidratador construido en la empresa Agroapoyo.

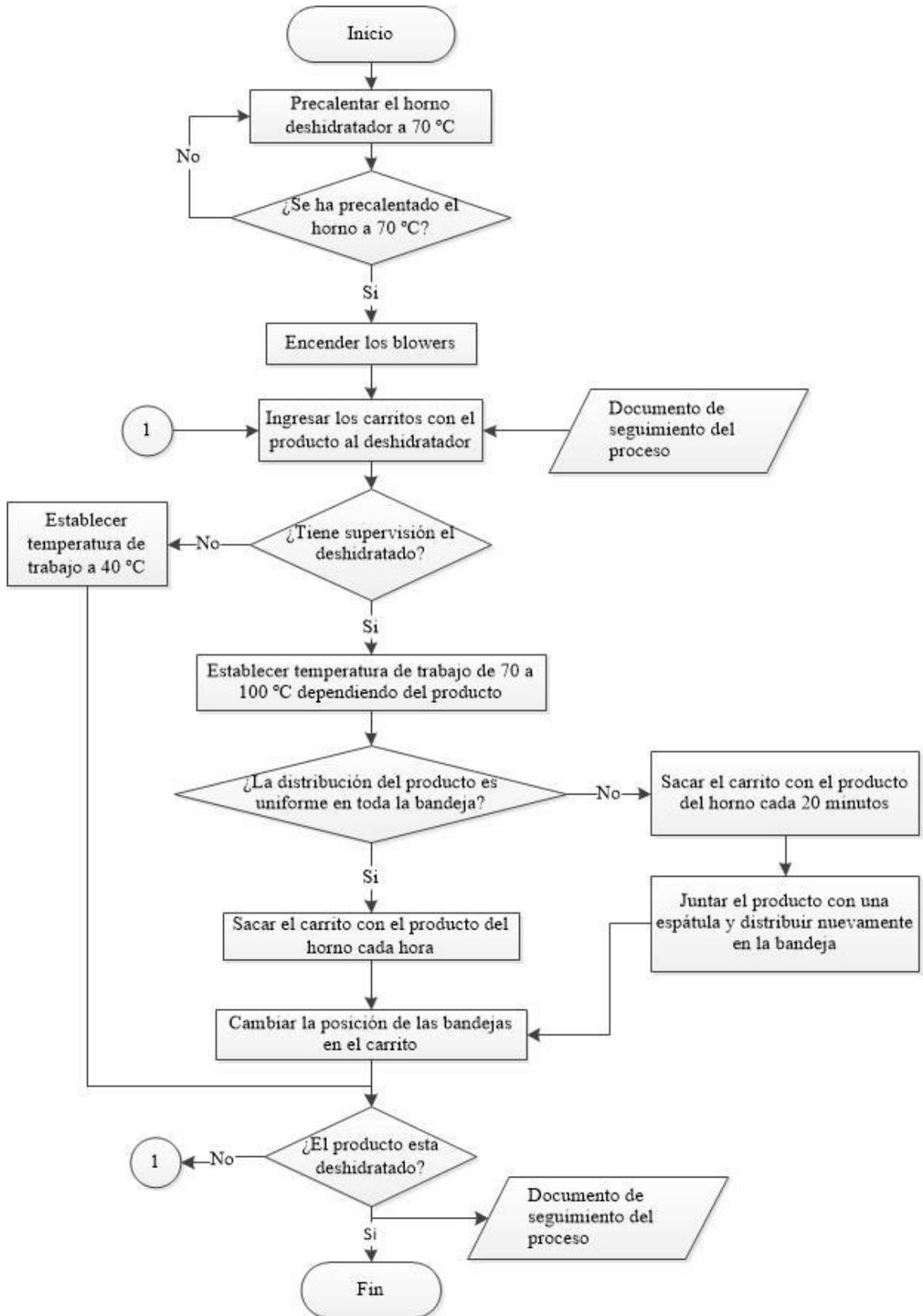
Tabla N.- 2.1 Características del horno deshidratador

N.	Descripción del Componente	Características	Datos de Operación	Observaciones
1	Dimensiones externas	3800 mm x 1900 mm x 1800 mm		Paredes con aislamiento térmico
2	Desfogue aire saturado humedad	Ø 110 mm	V _s = 6.2 m/s, T _s = 72 °C	
3	Ducto de retorno	800 mm x 400 mm		
4	Dimensiones interior (Cámara)	3600 mm x 1700 mm x 1600 mm		
5	Entrada de aire (2)	Ø 50 mm	V _e = 10.4 m/s, T _e = 30 °C	
6	Salida gases de combustión	Ø 110 mm	V _s = 3.1 m/s, T _s = 81 °C	
7	Serpentín Gases Combustión	1393 mm x 1300 mm x 200 mm		Paredes externas oxidadas, sin recubrimiento
8	Quemador	400.000 BTU/h	Funcionamiento Automático mediante un PLC	Wayne HSG400
9	Cañón del quemador		Ø 12"	
10	Motor blower (2)	220 V, 2.2 kW, 1720 rpm		Weq. reducción de velocidad al blower por bandas
11	Blower (2)	5800 CFM, 806 rpm	Boca de 400 mm x 246 mm	Dayton modelo 7J493, rueda 15-1/16 in
12	Sensor de temperatura			
13	Coche con bandejas (6)	640 mm x 700 mm x 1380 mm		Bandejas de acero inoxidable no perforadas

2.3 Diagrama del horno deshidratador



2.4 Diagrama de flujo del proceso



2.5 Observaciones realizadas

2.5.1 Productos en el proceso

En las visitas que se realizó a la empresa Agroapoyo y en el seguimiento del proceso de deshidratado se pudo observar lo siguiente:

- a) La gran variedad de productos que se someten al deshidratado hacen que sea difícil y costoso la determinación de tiempos dentro del horno, según se muestra a continuación la tabla N.- 2.2 de 1 mes de trabajo del horno.
El listado completo de productos deshidratados de la empresa Agroapoyo se detalla en el anexo N.- 5

Tabla N.- 2.2 Ingreso al horno deshidratador por lotes de productos

Semana	Productos
1	Guineo entero
2	Pimiento en cubos
3	Zanahoria en cubos
4	Uvilla entera

Fuente: Documento de seguimiento de deshidratados empresa Agroapoyo

La mayoría de veces se recurre a la experiencia de los operadores para examinar el estado del producto mientras esta adentro del horno, esto debido a que la carga de producto dentro del horno es muy variable siendo esta desde 20 kg a 250 kg.

- b) Los procesos previos antes de la entrada del producto al deshidratador no siempre son los adecuados para que el deshidratado se produzca de forma uniforme en cada bandeja, son por ejemplo la entrada de productos de una consistencia no definida como es el caso del pimiento en cubos mostrados en el gráfico N.- 2.1

Gráfico N.- 2.1 Pimiento en Cubos



Elaborado por: Hugo Muñoz

- c) Se realizó las mediciones de humedad en un lote de pimiento rojo, del carrito que entra en el deshidratador de 15 bandejas, de arriba hacia abajo se tomó muestras de la bandeja 1, 7 y 14 obteniéndose los siguientes datos:

Tabla N.- 2.3 Muestra de un lote de pimiento rojo

Bandeja	% humedad
1	18.9 %
7	21.7 %
14	14.1 %

Elaborado por: Hugo Muñoz

El lote permaneció adentro del deshidratador por 4 horas aproximadamente con una carga de 90 kg.

La tabla N.- 2.3 indica que el flujo de aire dentro del horno no es uniforme, ya que las condiciones de deshidratado varía dependiendo la ubicación de la bandeja en el carrito.

- d) Debido a las condiciones mencionadas en el literal b y c, los operadores deben rotar el producto cada 30 minutos, esto consiste en juntar y aspergear el producto con una espátula como se indica en el gráfico 2.2, esto hace que se pierda calor al abrir las puertas del horno constantemente.

Gráfico N.- 2.2 Juntado y aspergado del pimiento rojo



Elaborado por: Hugo Muñoz

2.5.2 Del horno

También se han realizado algunas observaciones de la estructura del horno deshidratador siendo estas:

- a) El horno deshidratador no está totalmente sellado, se producen fugas por pequeños orificios en las esquinas de las paredes, también los sellos de las puertas no impiden la salida del aire caliente al exterior.
- b) No hay un direccionamiento del aire dentro del horno deshidratador, este fluye libremente en toda la cámara hasta en sectores donde no hay producto a deshidratar.
- c) Normalmente los operadores no permiten la entrada de aire al deshidratador ya que esto produce una pérdida de calor, ya que el aire entra a temperatura ambiente.

2.6 Resultados del análisis

- Se constató que el deshidratado en la empresa Agroapoyo no cuenta con procesos de operación para los diferentes tipos de productos que se manejan, dependiendo del porcentaje de humedad de cada producto, y el tiempo de deshidratado.
- Se evaluó el comportamiento del aire dentro del deshidratador mediante las muestras tomadas en las bandejas, llegando a la conclusión que se debe realizar un rediseño del flujo de aire.
- Se comprobó que hay zonas donde se presenta fugas de aire caliente.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y REDISEÑO

Introducción

Para el análisis del diseño y rediseño de las condiciones del medio de deshidratado es necesario conocer las ecuaciones que gobiernan el flujo de aire y flujo de calor en un volumen de control.

La resolución de estas ecuaciones se efectúa a través de mecánica computacional de fluidos (CFD) donde se utilizan métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran fluidos.

En la mecánica de fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales no lineales que se utilizan para describir el movimiento de fluidos newtonianos, conjuntamente con CFD, estas ecuaciones entregarán resultados en un dominio 3D gráfica y analíticamente donde se podrá observar aproximadamente como es la distribución del flujo de calor y flujo de aire en la cámara del deshidratador.

Para conocer extensivamente todos los parámetros que involucra el diseño del horno deshidratador se debe ir a la clasificación de los deshidratadores y de allí encontrar el parámetro que se desea mejorar.

Con el análisis del simulador CFD, se podrá probar elementos que permitan el direccionamiento del aire, para que este efectivamente pase sobre las bandejas regularmente.

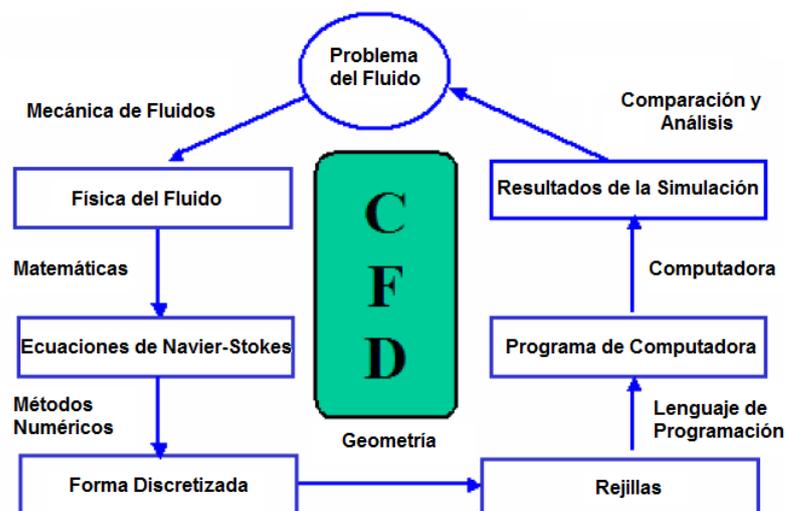
El modelo matemático de la manzana permitirá conocer teóricamente la evolución del deshidratado en este producto y la mejora que se está obteniendo en cuanto a tiempos de producción y consumo de energía.

3.1 Dinámica computacional de fluidos (CFD)

La CFD es la simulación de fluidos usando sistemas de modelación en ingeniería (formulación de problemas físico-matemáticos) y métodos numéricos (métodos de discretización, parámetros numéricos, generadores de rejilla, etc.).

En el gráfico N.- 3.1 se observa el proceso para la obtención de resultados a partir de CFD.

Gráfico N.- 3.1 Proceso CFD



Elaborado por: Wangda Zuo

Primero, se tiene un problema de fluido. Para resolver este problema, se debe conocer las propiedades del fluido usando la mecánica de fluidos. Entonces se pueden usar las ecuaciones matemáticas que describen esas propiedades físicas. Esta es la ecuación de Navier-Stokes y es la ecuación de gobierno de CFD.

Como la ecuación de Navier-Stokes es analítica, se lo puede resolver manualmente, sin embargo para resolver esta ecuación por computadora se deberá traducirlo a su forma discretizada.

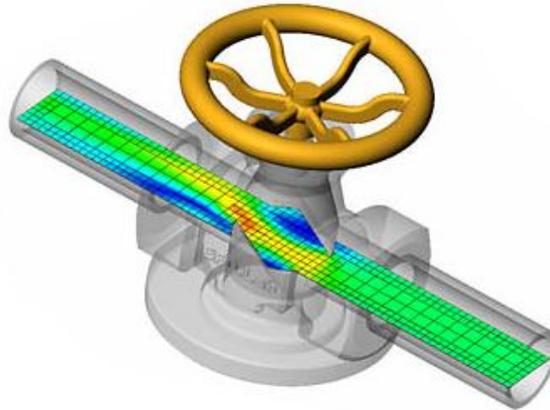
Los traductores son métodos de discretización numérica, como las de diferencias finitas, elementos finitos y métodos de volúmenes finitos. Por lo tanto, también se divide el dominio del problema general en muchas partes pequeñas porque la discretización se basa en estos. Los lenguajes típicos son el Fortran y C. Normalmente los programas son ejecutados en estaciones de trabajo o supercomputadores. Al final se logran conseguir los resultados de la simulación. Se comparan y analizan los resultados de la simulación con los experimentos y el problema real. Si los resultados no son suficientes para resolver el problema, se repetirá el proceso hasta encontrar la solución que satisfaga el problema.

La CFD permite a los científicos e ingenieros desarrollar "experimentos numéricos" (simulaciones computacionales) en un "laboratorio virtual" (computador). Estos experimentos permiten predecir comportamientos y conocer datos de las variables involucradas en el proceso.

Siempre que se habla de métodos numéricos, como los utilizados en CFD, se está hablando de aproximación, por lo que muchas veces será imposible garantizar que el modelo sea exacto.

Usando CFD es posible construir un modelo computacional que represente un sistema o equipo que se quiera estudiar. Después se especifican las condiciones físicas y químicas del fluido al prototipo virtual y el software entregará la predicción de la dinámica del fluido. Por lo tanto, CFD es una técnica de diseño y análisis implementada en el computador.

Gráfico N.- 3.2 Comportamiento de un fluido a través del paso por una válvula



Fuente: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/floefd/>

La herramienta CFD ofrece la capacidad de simular flujos de gases, líquidos, transferencia de masa y calor, cuerpos en movimiento, física multi-fases, reacciones químicas, interacción fluido-estructura y acústica a través de la modelación en el computador.

3.1.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

3.1.1.1 Ley de la conservación

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones que gobiernan la dinámica computacional de fluidos. Se basan en la ley de la conservación de las propiedades físicas del fluido. El principio de la ley de la conservación es el cambio de propiedades, como por ejemplo la masa, la energía y el momentum.

Por ejemplo, el cambio de masa en el objeto es la siguiente:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

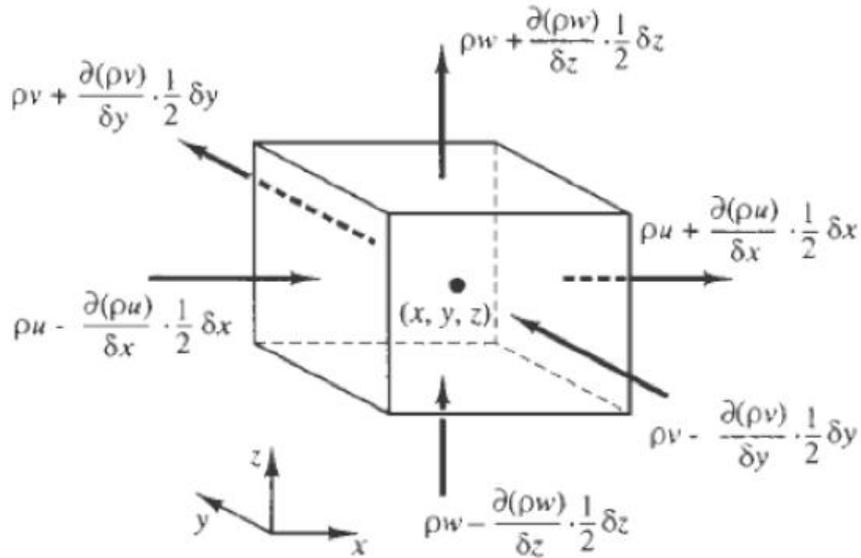
Si $\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0$, se tiene:

$$\frac{dM}{dt} = 0$$

Lo que significa que: $M = const$

En el siguiente gráfico se observa el flujo másico que entra y sale de un elemento finito.

Gráfico N.- 3.3 Flujo másico que entra y sale de un elemento fluido



Autor: Versteeg, H. K.

3.1.1.2 Ecuación de Navier-Stokes

Aplicando la conservación de la masa, el momentum y la energía, se puede derivar la ecuación de la continuidad, la ecuación del momentum y la ecuación de la energía de la siguiente manera.

Ecuación de la continuidad

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

Ecuación del momentum

$$\underbrace{\rho \frac{\partial U_j}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{II} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_j}}_{III} - \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}}_{IV} + \underbrace{\rho g_j}_V$$

Donde

$$\tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$$

- I: Cambio local con el tiempo
- II: Convección del momentum
- III: Fuerza superficial
- IV: Intercambio del momentum molecular dependiente (difusión)
- V: Fuerza de masa

Ecuación de la energía

$$\underbrace{\rho c_\mu \frac{\partial T}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho c_\mu U_i \frac{\partial T}{\partial x_i}}_{II} = -P \underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial x_i}}_{III} + \lambda \underbrace{\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}}_{IV} - \tau_{ij} \underbrace{\frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_V$$

- I: Cambio local con el tiempo
- II: Término convectivo
- III: Presión de trabajo
- IV: Flujo de calor (difusión)
- V: Transferencia irreversible de energía mecánica en calor

Si el fluido es compresible, se puede simplificar la ecuación de continuidad y la ecuación del momentum de la siguiente manera.

Ecuación de la continuidad

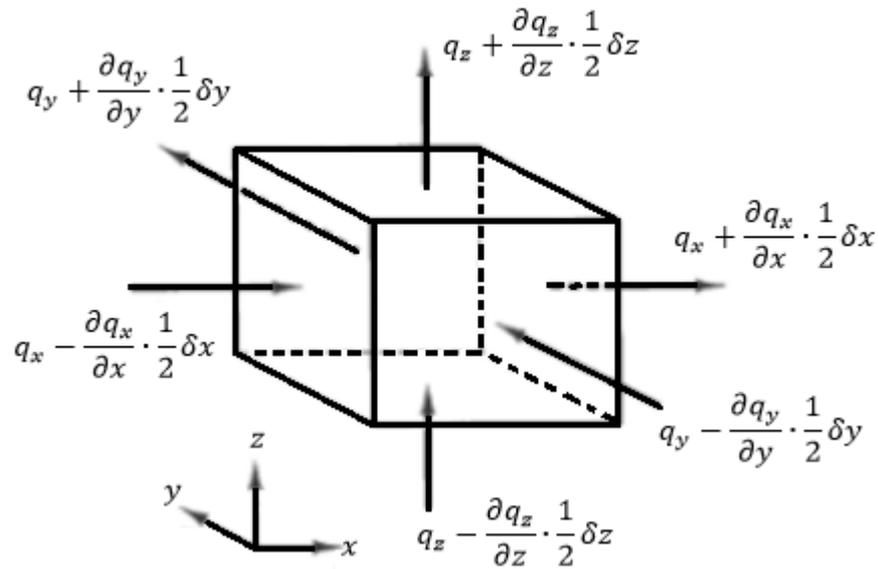
$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

Ecuación del momentum

$$\rho \frac{\partial U_j}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} - \mu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} + \rho g_j$$

En el siguiente gráfico se observa el los vectores de calor de un elemento fluido.

Gráfico N.- 3.4 Vectores de calor de un elemento fluido



Autor: Versteeg, H. K.

3.1.1.3 Forma general de la ecuación de Navier-Stokes

Para simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes, se puede reescribirla como la forma general.

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = q_\Phi$$

Cuando $\Phi = 1, U_j, T$, respectivamente, se consigue obtener la ecuación de la continuidad, la ecuación del momentum y la ecuación de la energía.

3.1.2 Método del volumen finito

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones analíticas. Estas se pueden entender y resolver manualmente, pero si se quiere resolver por computadora, se las debe transferir a su forma discretizada.

3.1.2.1 Enfoque del método de volúmenes finitos

Integrando la forma general de la ecuación de Navier-Stokes sobre un volumen de control y aplicando la teoría de Gauss se obtiene.

$$\int_V \frac{\partial}{\partial x_i} \Phi dV = \int_S \Phi \cdot n_i dS$$

Se obtiene la forma integral de la ecuación de Navier-Stokes

$$\int_V \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} dV + \int_S \left(\rho U_i \Phi - \Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x_i} \right) \cdot n_i dS = \int_V q_\Phi dV$$

Para aproximar la integral del volumen, se multiplica el volumen y el valor en el centro del volumen de control. Por ejemplo, se tiene un dominio en 2D como en el gráfico N.- 3.5, para aproximar la masa y el momentum del volumen de control P se tiene:

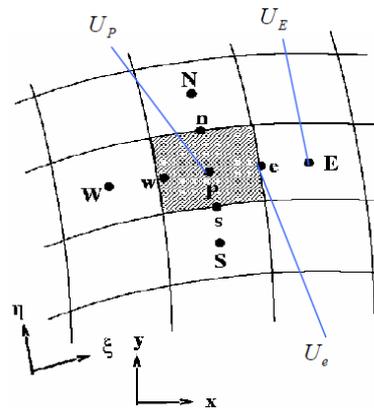
$$m = \int_{V_i} \rho dV \approx \rho_p V, \quad mu = \int_{V_i} \rho_i u_i dV \approx \rho_p u_p V$$

Para aproximar la integral de la superficie, por ejemplo, la fuerza de presión se tiene:

$$\oint_{S_i} P dS \approx \sum_k P_k S_k \quad k = n, s, e, w$$

Normalmente se almacenan las variables en el centro del volumen de control, por lo que se necesita interpolar para conseguir P_k , los cuales están localizados en la superficie del volumen de control.

Gráfico N.- 3.5 Dominio de rejilla estructurada



Elaborado por: Wangda Zuo

3.1.3 Conservación del Método de Volúmenes Finitos

Si se utiliza diferencias finitas y el enfoque de elementos finitos para discretizar la ecuación de Navier-Stokes, se controlará manualmente la conservación de la masa, el momentum y la energía. Pero con el método de volumen finito, se encontrará fácilmente que, si la ecuación de Navier-Stokes se satisface en cada volumen de control, automáticamente será satisface para todo el dominio. En otras palabras, si la conservación se satisface en cada volumen de control, esta se satisface automáticamente para todo el dominio.

3.1.4 Energía Cinética Turbulenta (TKE)

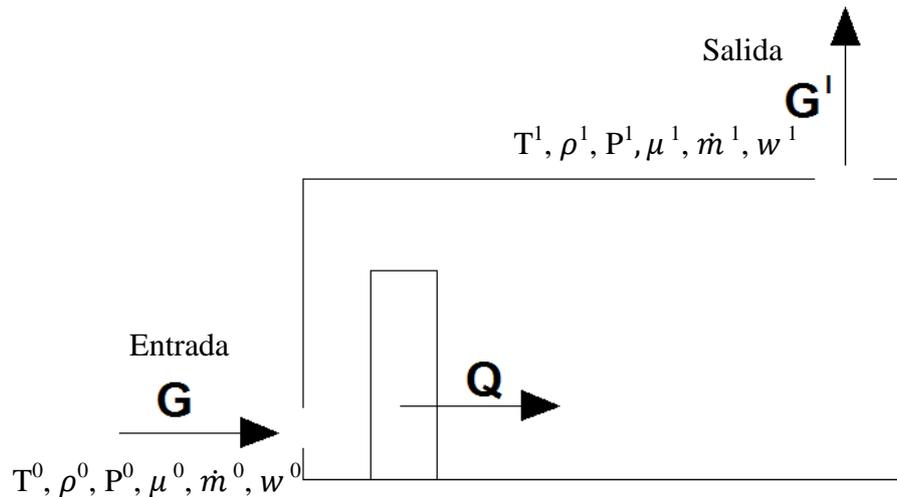
La energía cinética turbulenta también conocida como TKE por sus siglas en inglés (Turbulence Kinetic Energy) representa la "fuerza" de la turbulencia en el flujo. La turbulencia y la energía cinética turbulenta están fuertemente relacionadas con la cizalladura del viento.

El análisis de la energía cinética turbulenta permitirá examinar de mejor manera la cantidad de energía que se desarrolla por efecto del aire tanto en el diseño como en el rediseño.

3.1.5 Volumen de control del deshidratado

El volumen de control que se analizará en el proceso de deshidratado será en estado estacionario, tiene entradas y salidas que dependen de parámetros que se analizan independientemente como se observa en el gráfico.- 3.6

Gráfico N.- 3.6 Volumen de control del deshidratado



Elaborado por: Hugo Muñoz

La entrada y la salida del volumen de control está dada por un caudal volumétrico y el calor entregado, además del caudal se analizan variables como la temperatura, la presión, la densidad del aire, viscosidad, flujo másico y humedad que en la cámara cambian conforme se efectúa el deshidratado de los frutos.

3.2 Clasificación de los deshidratadores

En la actualidad existe una gran diversidad de equipos que cumplen la función de deshidratar los alimentos por los métodos señalados en el capítulo anterior donde el principal recurso para transferir energía y transportar humedad es el aire caliente.

Los equipos de deshidratado por aire caliente se clasifican según el modo de operación, tipo de entrada del calor, estado del material en el deshidratador, presión y

temperatura de operación, medio de deshidratado, movimiento entre el producto y el medio circundante y el número de etapas.

Tabla N.- 3.1 Clasificación de los deshidratadores

Criterio	Tipos
Modo de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Por lotes • Continuo*
Entrada de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Convección*, conducción, radiación, campos electromagnéticos, combinación de modos de transferencia de calor • Intermitente o continuo* • Adiabático o no-adiabático
Estado del material en el deshidratador	<ul style="list-style-type: none"> • Estacionario • En movimiento, agitación, dispersión
Presión de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Al vacío* • Atmosférico
Medio de secado (convección)	<ul style="list-style-type: none"> • Aire • Vapor sobrecalentado • Gases de combustión
Temperatura de secado	<ul style="list-style-type: none"> • Debajo del punto de ebullición* • Encima del punto de ebullición • Debajo del punto de congelación
Movimiento relativo entre el medio de secado y el material a secarse	<ul style="list-style-type: none"> • En dirección a la corriente • En contra corriente • Flujo mixto
Numero de etapas	<ul style="list-style-type: none"> • Una etapa* • Multi-etapa
Tiempo de permanencia	<ul style="list-style-type: none"> • Corto (<1 minuto) • Medio (1 - 60 minutos) • Largo (>60 minutos)

*Más común en la práctica

■ Parámetros actuales

Fuente: <http://serve.me.nus.edu.sg/arun/file/teaching/ME5202/Chapter2%20and%203.pdf>

Este es un horno que opera mediante lotes que van desde los 100 kg hasta los 250 kg, dependiendo del producto a deshidratar.

El producto en el horno tienen una entrada de calor por convección que se produce por el paso de aire caliente alrededor de este, y de conducción al calentarse las bandejas metálicas, la entrada de calor es continuo y no adiabático.

El producto permanece estacionario dentro del horno, su presión de operación es atmosférica debido a que el aire que ingresa a la cámara sale sin producir compresión o una presión de vacío en este.

El medio con el que se seca el producto dentro del deshidratador es aire caliente con una temperatura por debajo del punto de ebullición del agua.

El horno es de una etapa, ya que no se producen cambios de temperatura ni de velocidad de aire en el transcurso del proceso.

Las bandejas en este tipo de deshidratadores tienen una permanencia dentro de la cámara superior a los 90 minutos, debido a las bajas temperaturas con las que opera.

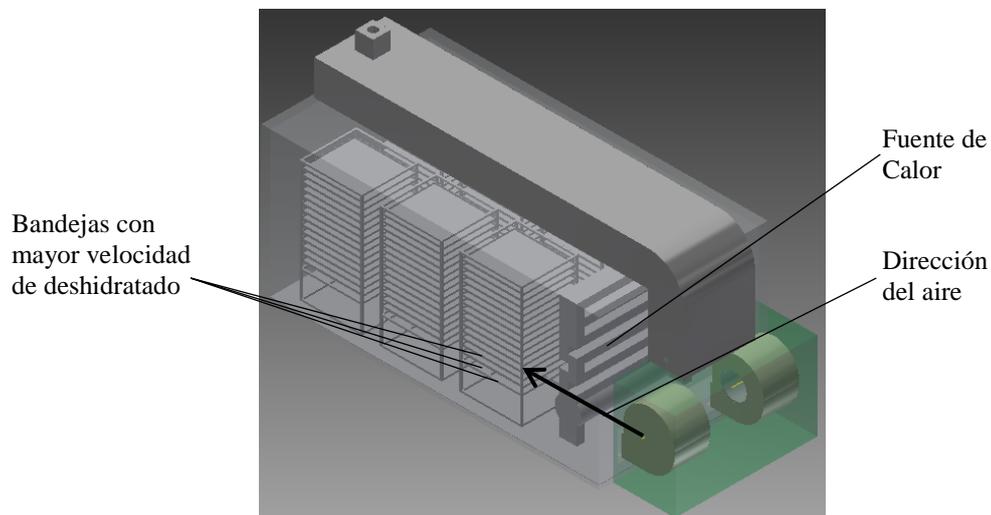
Los parámetros mencionados describen a detalle el funcionamiento del diseño del horno, siendo de gran interés el medio de secado ya que en los parámetros del equipo y del proceso se observó una falla en la distribución de aire en la cámara del horno.

3.3 Flujo de aire dentro de la cámara del deshidratador

La mayoría de hornos deshidratadores por bandejas enfrentan un mismo problema de diseño en el proceso de deshidratado el cual consiste en el flujo de calor incontrolable e inestable dentro de la cámara.

Cuando el calor es suministrado desde la parte inferior del horno, la bandeja que está más cerca de la fuente de calor se seca más rápidamente que las otras bandejas como se puede observar en el gráfico N.- 3.7

Gráfico N.- 3.7 Incidencia en la velocidad de deshidratado



Elaborado por: Hugo Muñoz

Si se tiene la necesidad de deshidratar el producto en un ciclo de deshidratado, esto es imposible debido a que el producto que está cerca de la fuente de calor se puede dañar afectando a la calidad del producto.

La clave de una operación exitosa es la distribución del flujo de aire uniforme sobre las bandejas debido a que la bandeja de deshidratado más lento decide el tiempo de residencia requerido y por lo tanto la capacidad del deshidratador. La deformación de las bandejas también puede causar una mala distribución de aire y por lo tanto un pobre rendimiento del deshidratador. (DEVAHASTIN, 2000)

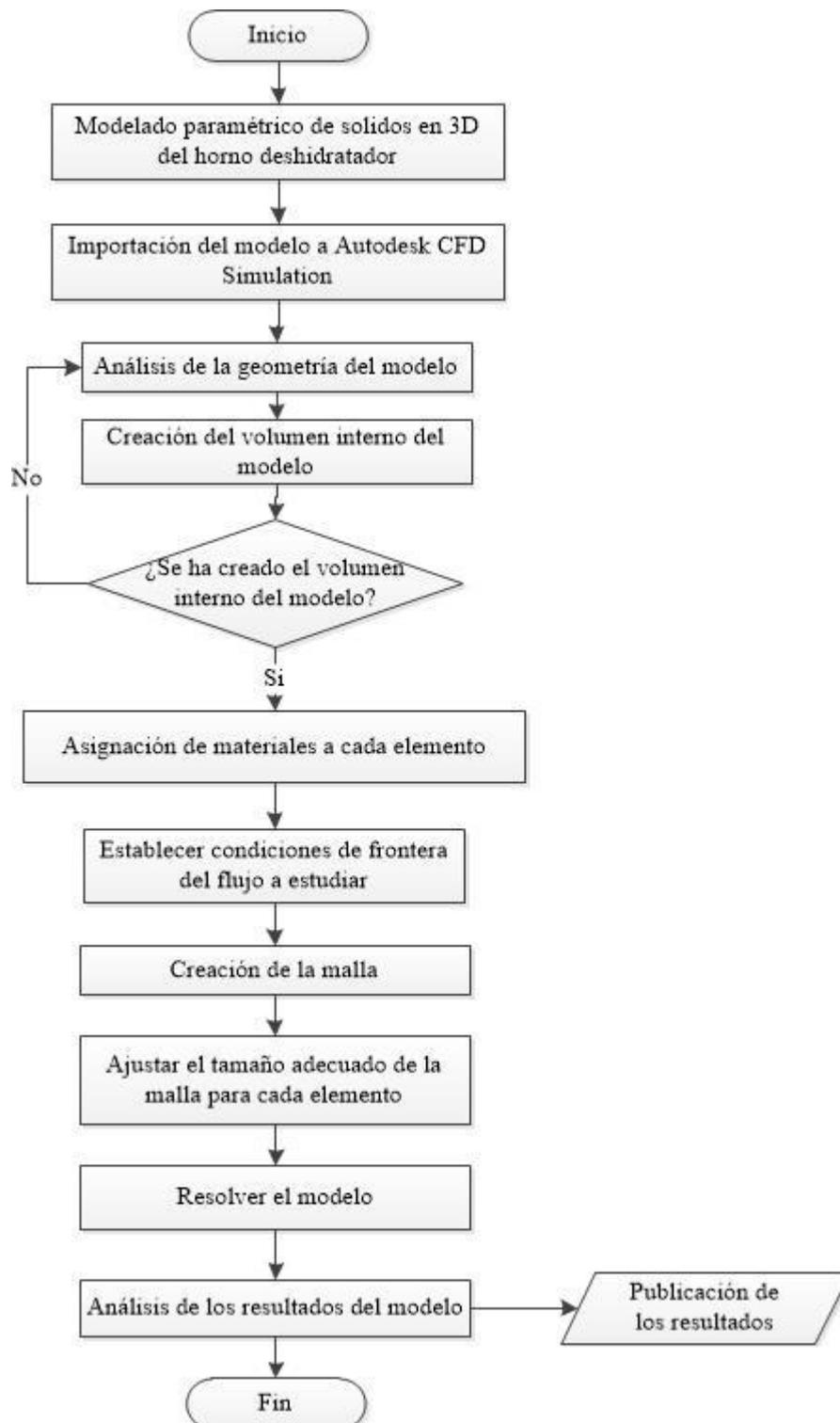
El propósito principal del sistema es deshidratar el producto que lleva la humedad o líquido internamente o externamente. En el interior del sistema de deshidratado tiene dos componentes principales que es el calentador y el ventilador o soplador (blower).(DEVAHASTIN, 2000)

Sin uno de estos componentes, el sistema de deshidratado fallará para completar el proceso adecuadamente. Básicamente, en el inicio del proceso de deshidratado, el calentador comenzará a generar calor hasta que requiere cierta temperatura y al mismo tiempo, el ventilador o soplador también comenzará a operar el cual está detrás de la estufa o fuente de calor. (DALFSEN, 1999)

Después de eso, el flujo de calor pasará a través del producto y el proceso de convección transportará el contenido de humedad o líquido en el producto para el sistema de canalización o sistema de salida directa. (TANTHAPANICHAKOON, 2002)

Basados en el concepto de diseño, algunos deshidratadores están utilizando el sistema de recalentamiento para ahorrar energía y costos.

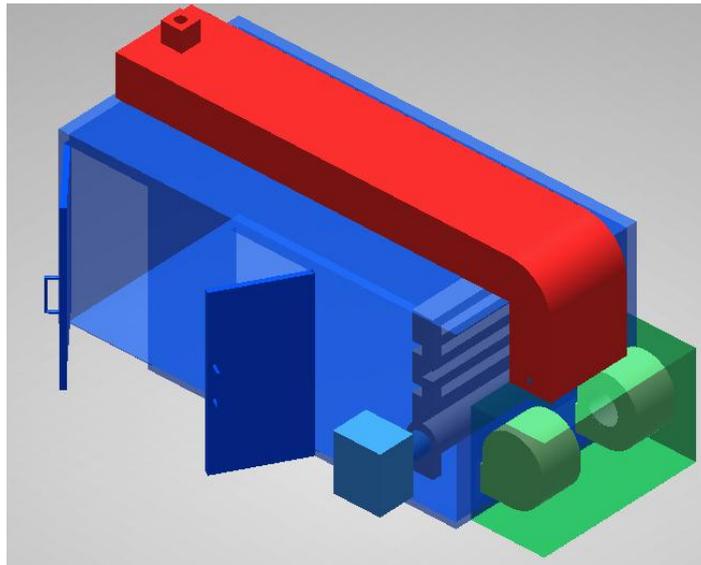
3.4 Diagrama de Flujo simulación (Autodesk CFD Simulation)



3.5 Diseño y modelado

En el gráfico N.- 3.8 y N.- 3.9 se muestra el diseño global del horno deshidratador que consta de varios componentes, el diseño será analizado y simulado utilizando Autodesk CFD Simulation.

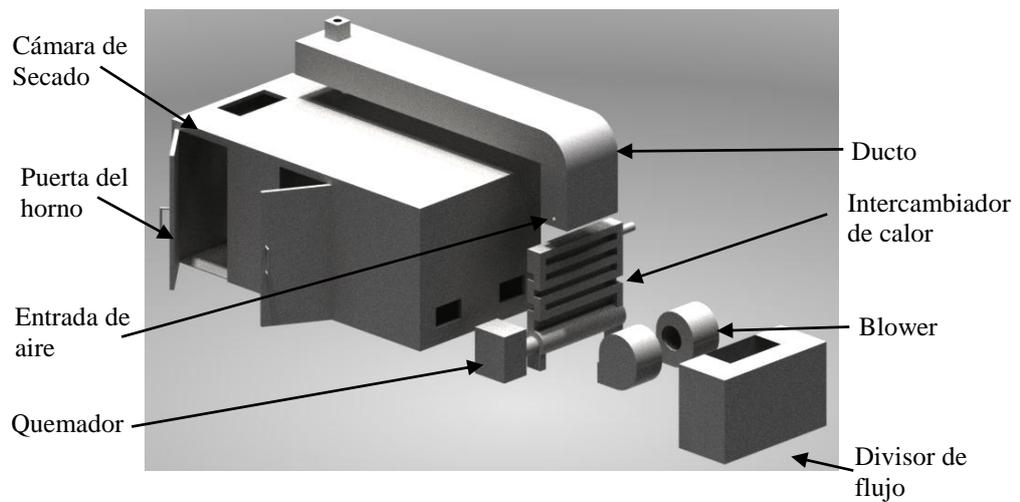
Gráfico N.- 3.8 Diseño del horno deshidratador



Fuente: Autodesk Inventor 2014

Elaborado por: Hugo Muñoz

Gráfico N.- 3.9 Vista de los componentes del horno deshidratador



Fuente: Autodesk Inventor 2014

Elaborado por: Hugo Muñoz

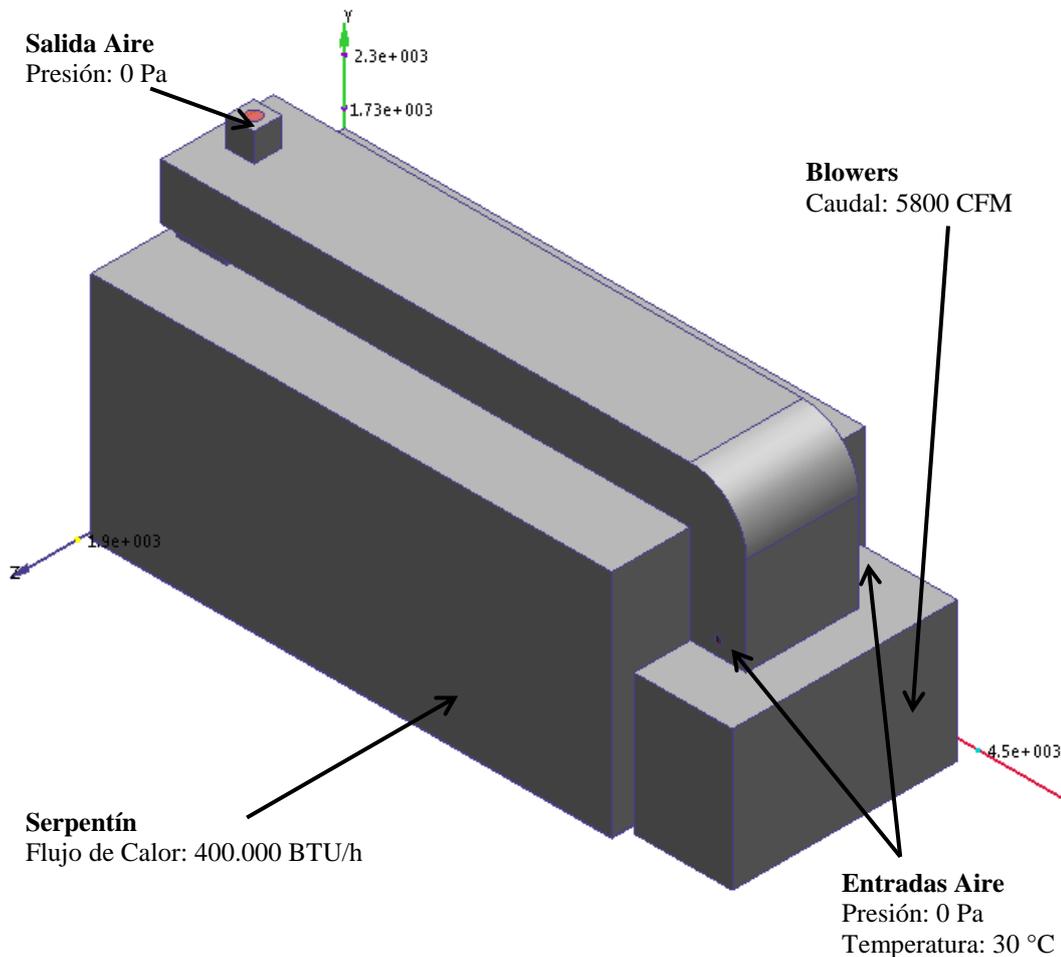
3.5.1 Análisis CFD de los parámetros actuales

Las diferentes condiciones que requiere el diseño para que pueda ser simulado en Autodesk CFD Simulation depende de un modelo correcto realizado en Autodesk Inventor, cabe recalcar que se construye un modelo vacío (sin volumen), este volumen puede ser creado en Autodesk Fusion, o en Autodesk CFD Simulation si el modelo no es demasiado complicado.

3.5.2 Condiciones de frontera y mallado

Las condiciones de frontera iniciales se obtienen con los parámetros actuales del horno deshidratador, estas serán las entradas y las salidas del aire como se muestra en el Gráfico N.- 3.10.

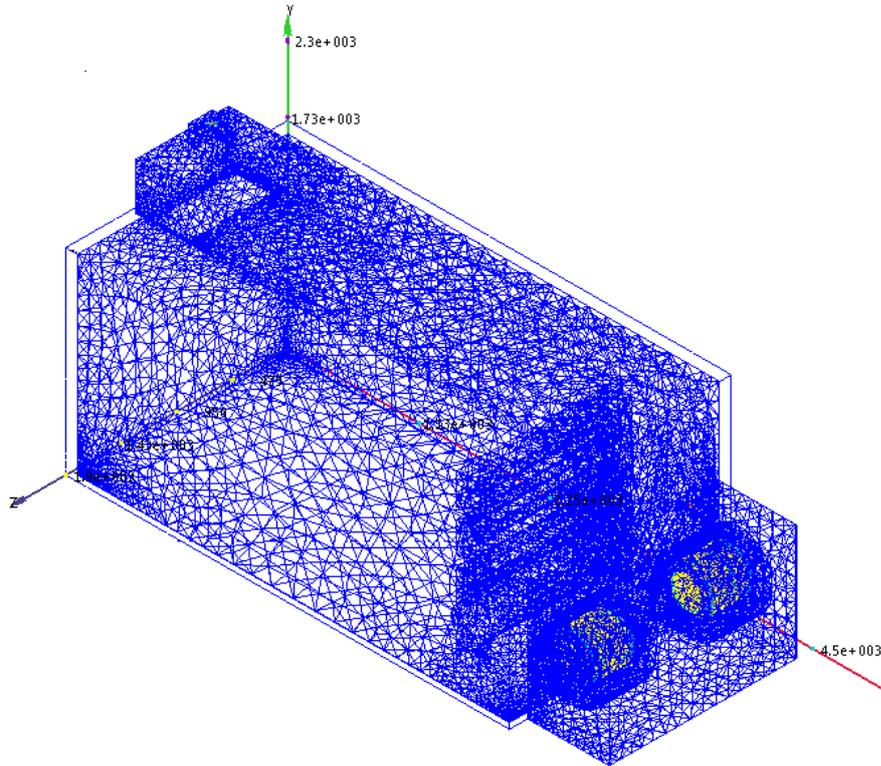
Gráfico N.- 3.10 Condiciones de frontera



Elaborado por: Hugo Muñoz

El mallado del modelo se produce usando varios tipos de elementos finitos, debido a la complejidad de la topología se tienen elementos tetraédricos, piramidales y prismáticos como se puede observar en el Gráfico N.- 3.11.

Gráfico N.- 3.11 Mallado del modelo



Elaborado por: Hugo Muñoz

Algunos parámetros y propiedades que se necesitan durante el análisis se muestran en la Tabla N.- 3.2.

Tabla N.- 3.2 Parámetros del aire durante la simulación

No	Parámetro Físico	Observaciones
1	Fluido	Aire
2	Densidad del aire	1,127 kg/m ³
3	Calor Especifico (Cp)	1010 j/kg.°K
4	Conductividad Térmica	0,0242 w/m-°K
5	Viscosidad	1,7894 e-05 kg/m-s
6	Temperatura de entrada	30 °C
7	Presión Manométrica	101325 Pa

Elaborado por: Hugo Muñoz

3.5.3 Análisis y validación de resultados

La validación de los resultados de este trabajo numérico que efectúa el simulador se puede realizar con la comparación de los resultados experimentales que se ha verificado previamente en el horno deshidratador, estos resultados consisten en:

- a) Medición de la velocidad del aire en zonas específicas del horno deshidratador mediante un anemómetro digital.
- b) Toma de muestras de un producto del carrito de bandejas en ubicaciones críticas para medir su humedad.
- c) Demostración con el modelo matemático de la manzana bajo condiciones ideales.

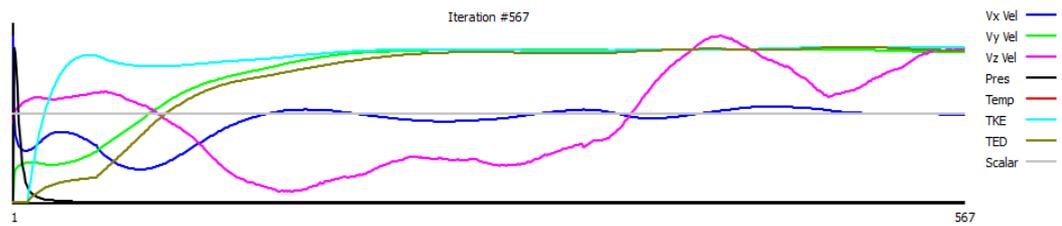
3.5.4 Forma de comparación

La comparación de los resultados que se establezcan en el simulador está estrechamente ligados al fenómeno que se produce dentro del deshidratador, es por esto que se analizarán resultados del simulador focalizados en los datos experimentales del deshidratador.

3.5.5 Convergencia del diseño

Como se muestra en el Gráfico N.- 3.12, la velocidad de flujo se distribuye uniformemente en cada dirección y las variables de flujo representativo y energía muestran que los residuos se han estancado y no cambian con mayor iteración. Por lo tanto, la convergencia en el modelo es consistente en el transcurso del tiempo.

Gráfico N.- 3.12 Convergencia del modelo

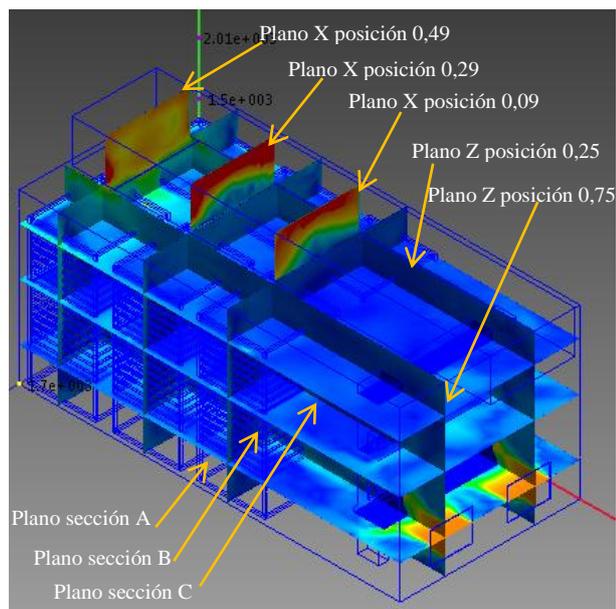


Elaborado por: Hugo Muñoz

Como se puede observar, el modelo converge en las 567 iteraciones, dado que se está haciendo el análisis de un flujo estacionario.

Para efectuar el análisis, se dividirá la cámara en los planos críticos en donde pasa el aire directamente por la mitad de las bandejas, este se encuentra detallado en el gráfico N.- 3.13.

Gráfico N.- 3.13 Planos de análisis



Elaborado por: Hugo Muñoz

3.5.6 Análisis de los planos en el eje X

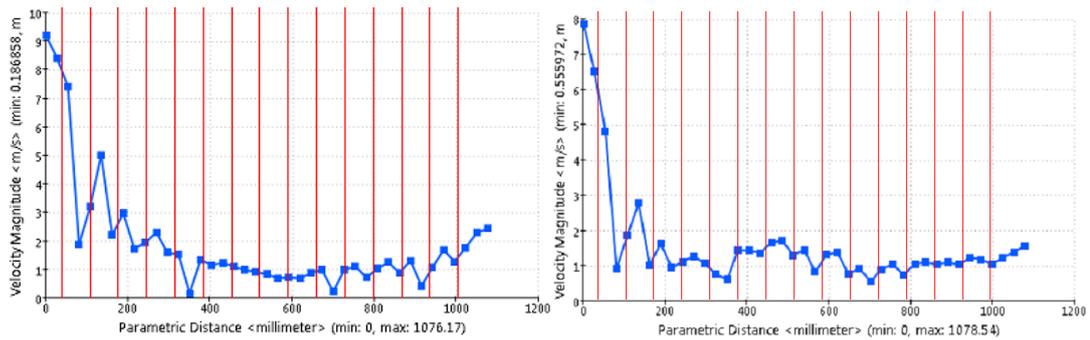
Plano X en la posición 0,49

Las líneas rojas en las gráficas A y B, muestran la incidencia del aire directamente sobre cada bandeja desde la inferior hasta la superior.

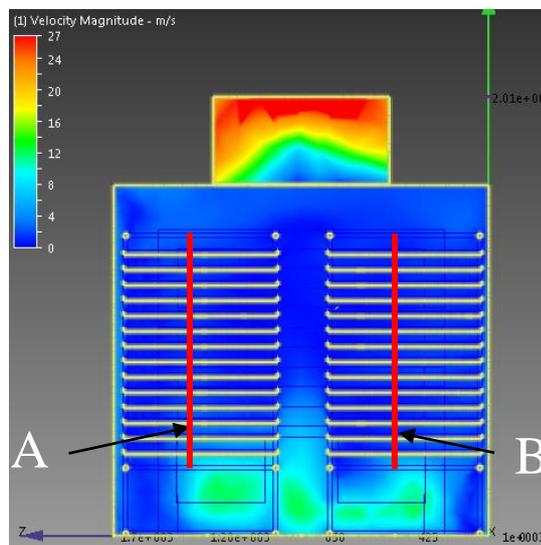
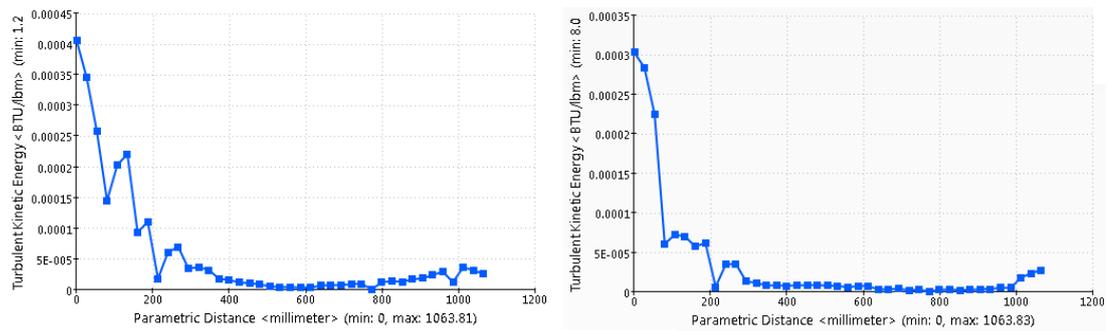
Sección A

Sección B

Velocidad del Aire



Energía Cinética Turbulenta

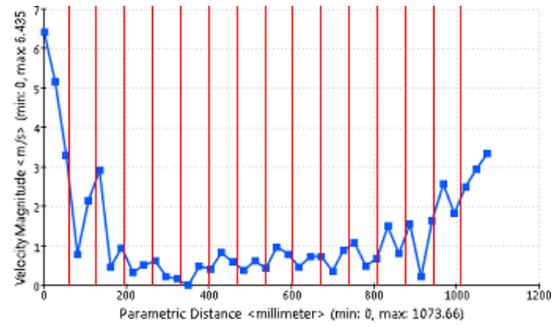
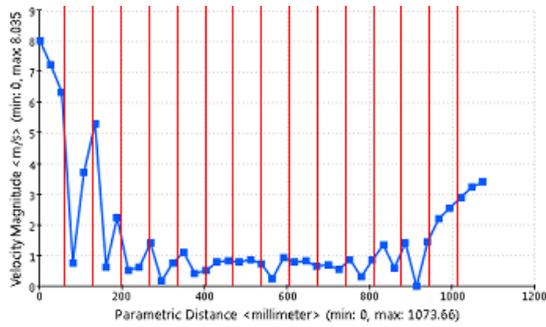


Plano X en la posición 0,29

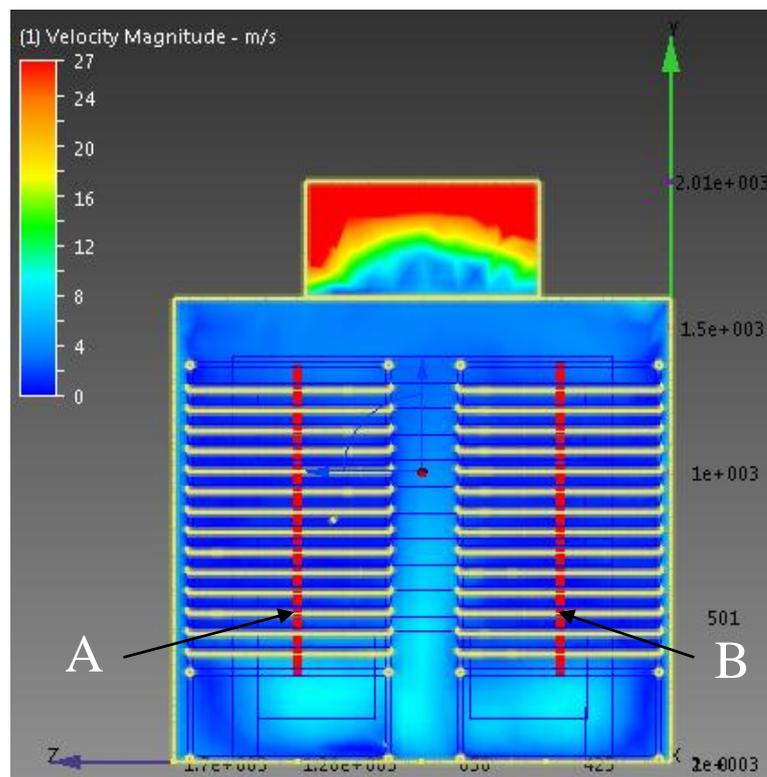
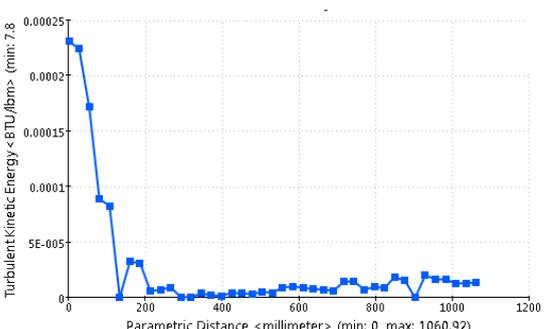
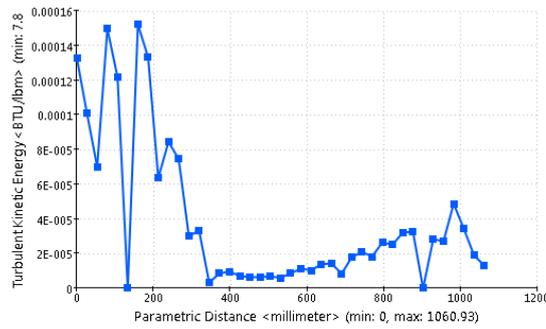
Sección A

Sección B

Velocidad del Aire



Energía Cinética Turbulenta

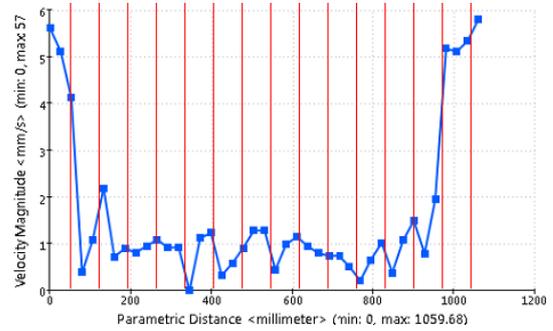
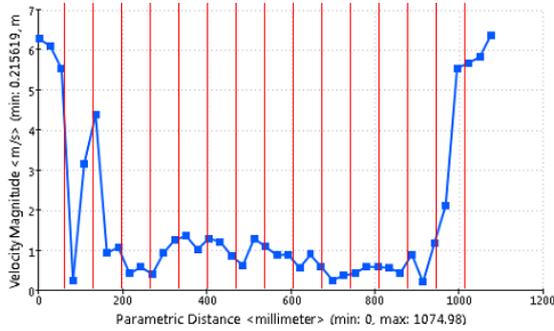


Plano X en la posición 0,09

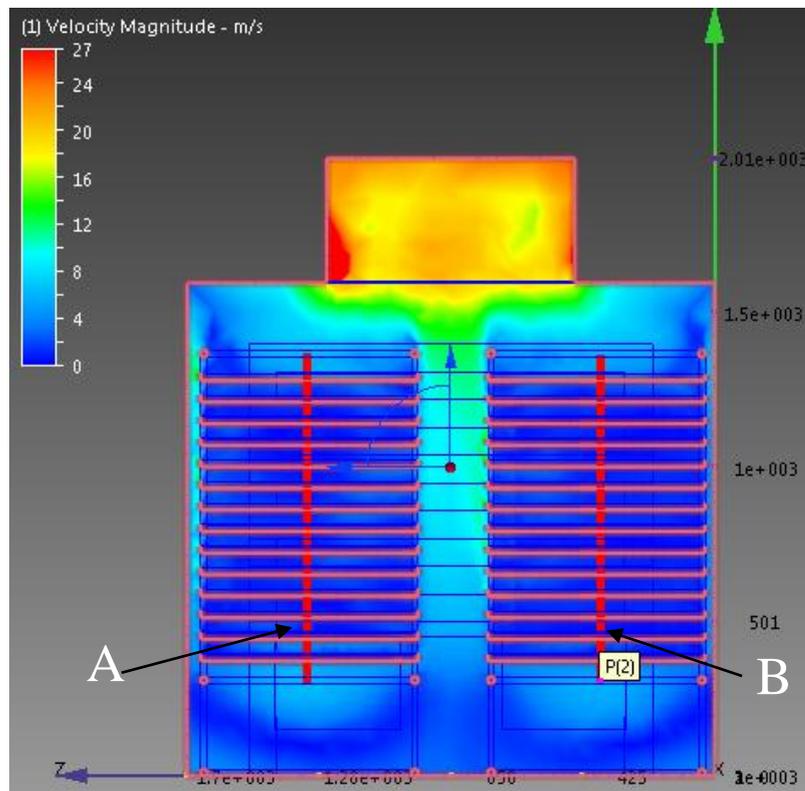
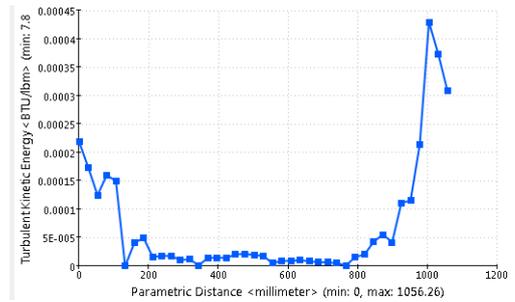
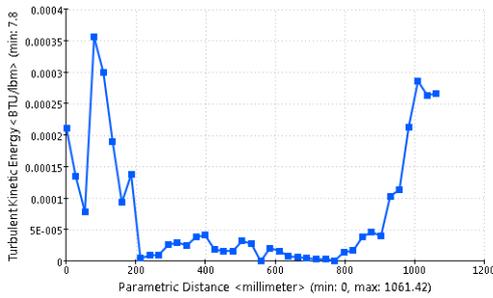
Sección A

Sección B

Velocidad del Aire



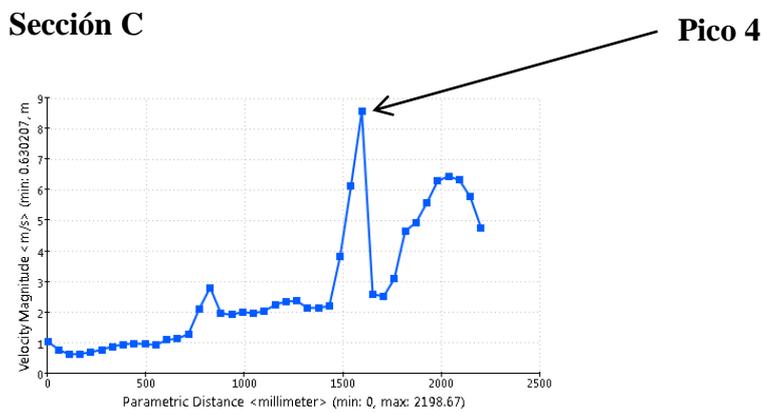
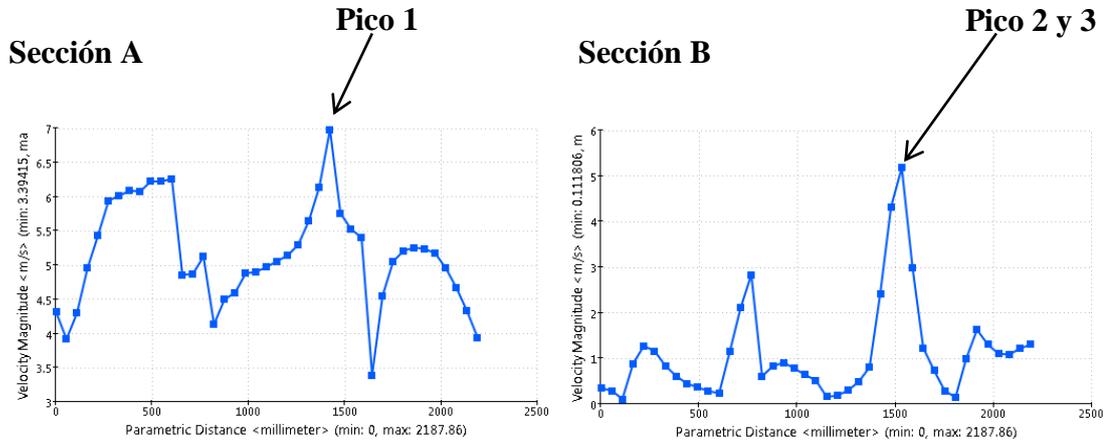
Energía Cinética Turbulenta



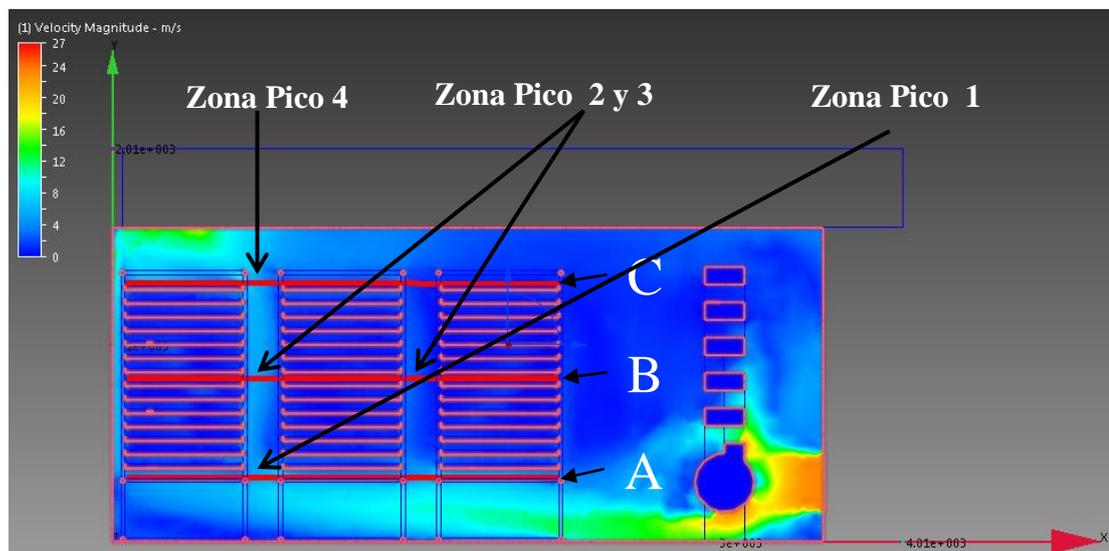
3.5.7 Análisis de los planos en el eje Z

La incidencia del aire para la representación gráfica es de derecha a izquierda.

Plano Z en la posición 0,25

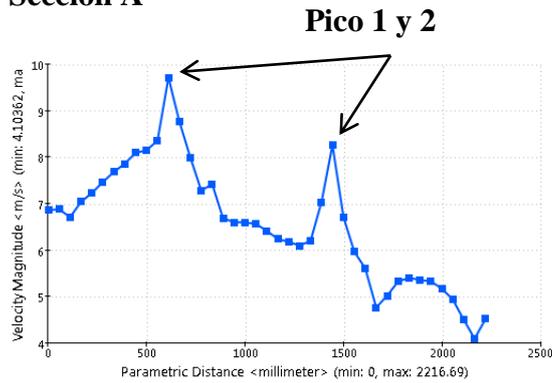


Los picos en cada gráfica representan la circulación libre de aire donde no hay bandejas.

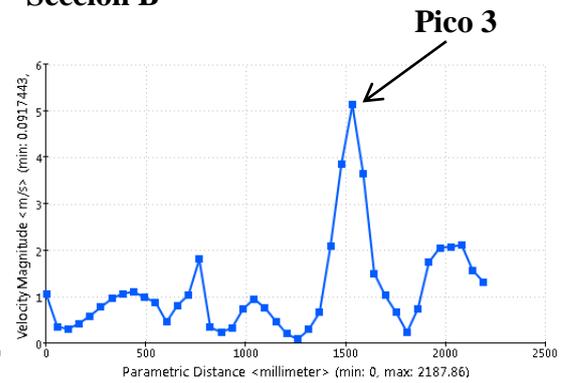


Plano Z en la posición 0,75

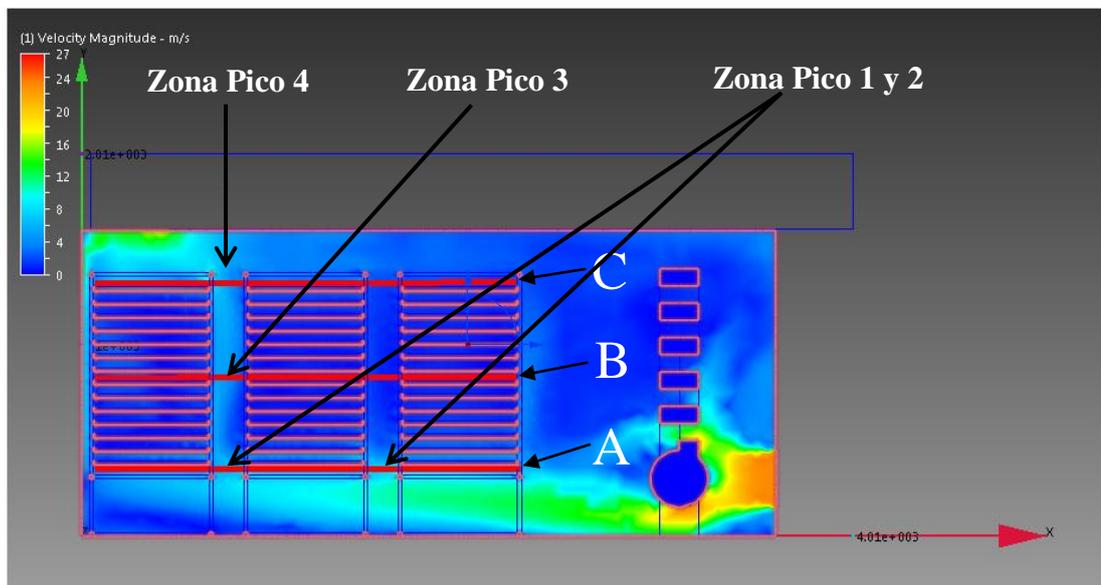
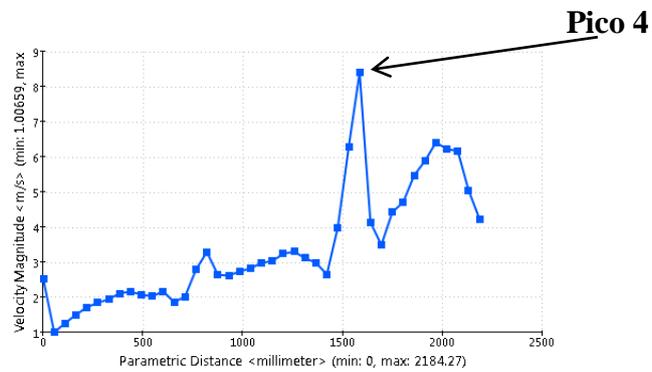
Sección A



Sección B

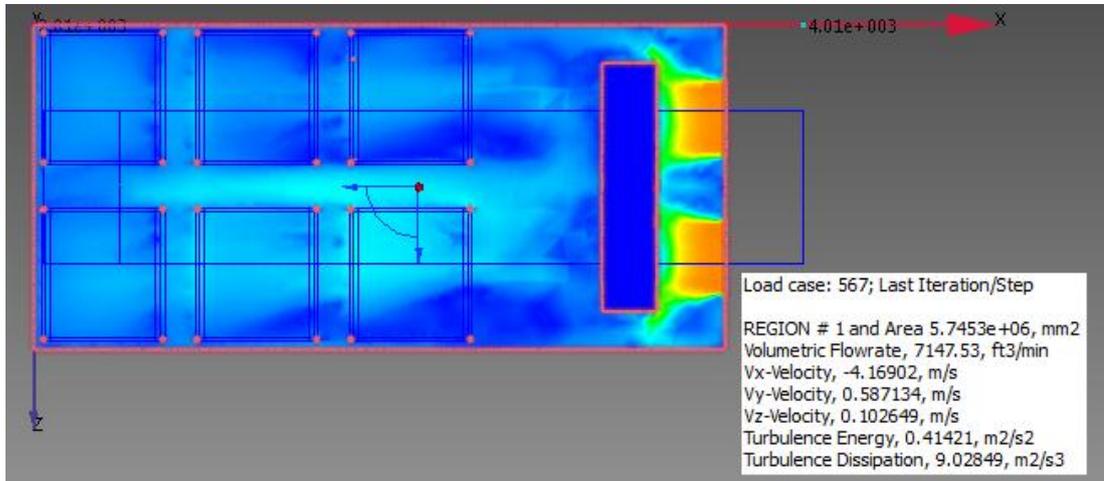


Sección C

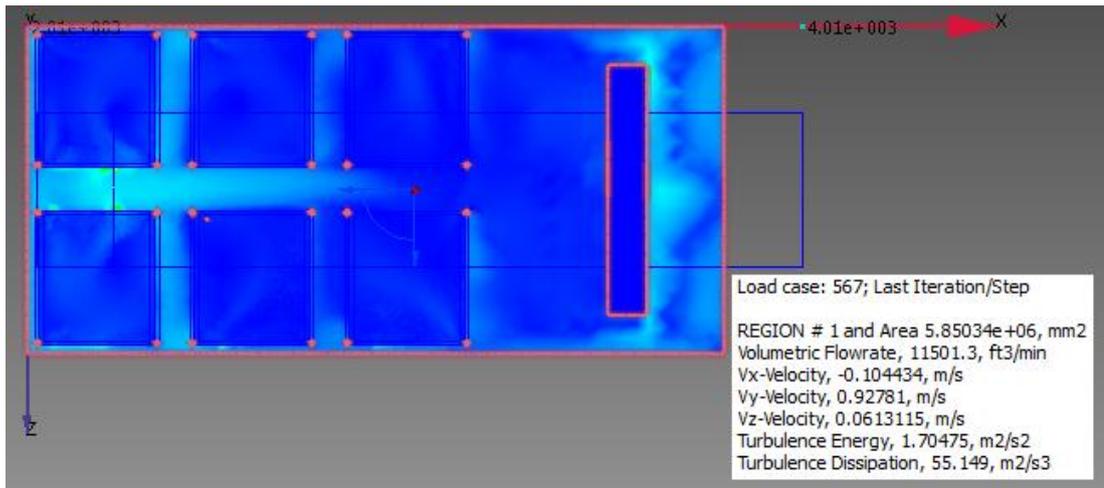


Plano Y

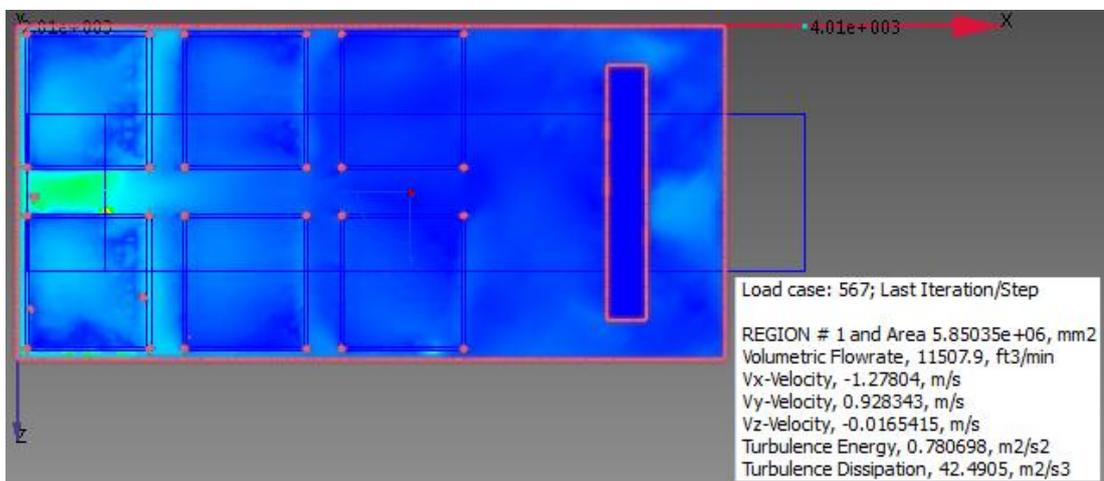
Sección A



Sección B



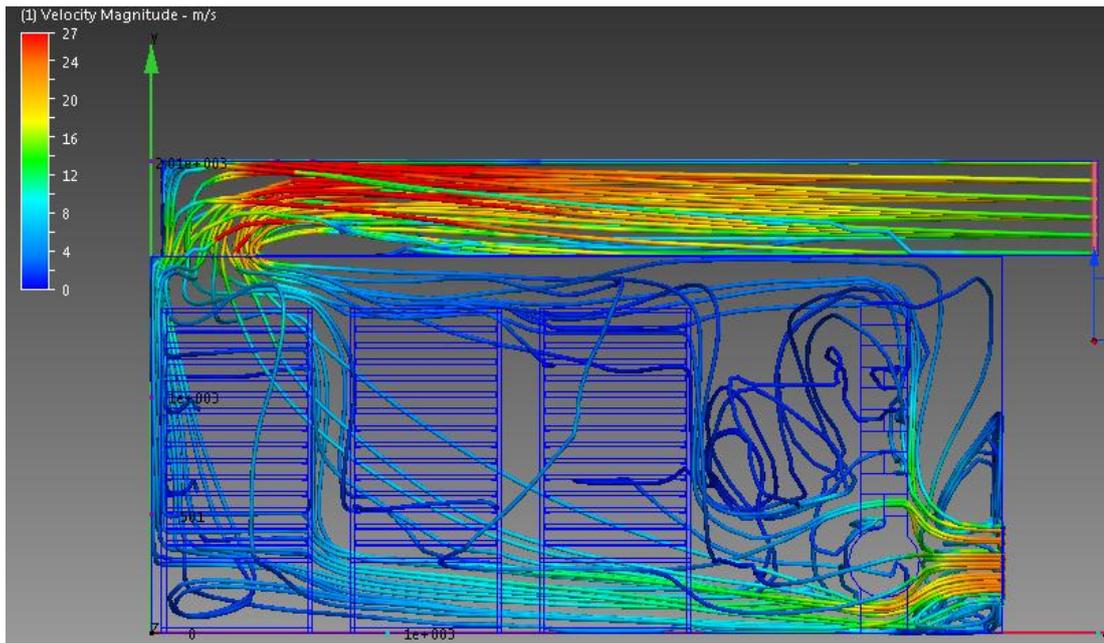
Sección C



3.5.8 Representación de trazos

La representación de trazos permite observar más claramente como es el comportamiento del aire dentro del horno como se muestra en el gráfico N.- 3.14.

Gráfico N.- 3.14 Representación de trazos diseño



Elaborado por: Hugo Muñoz

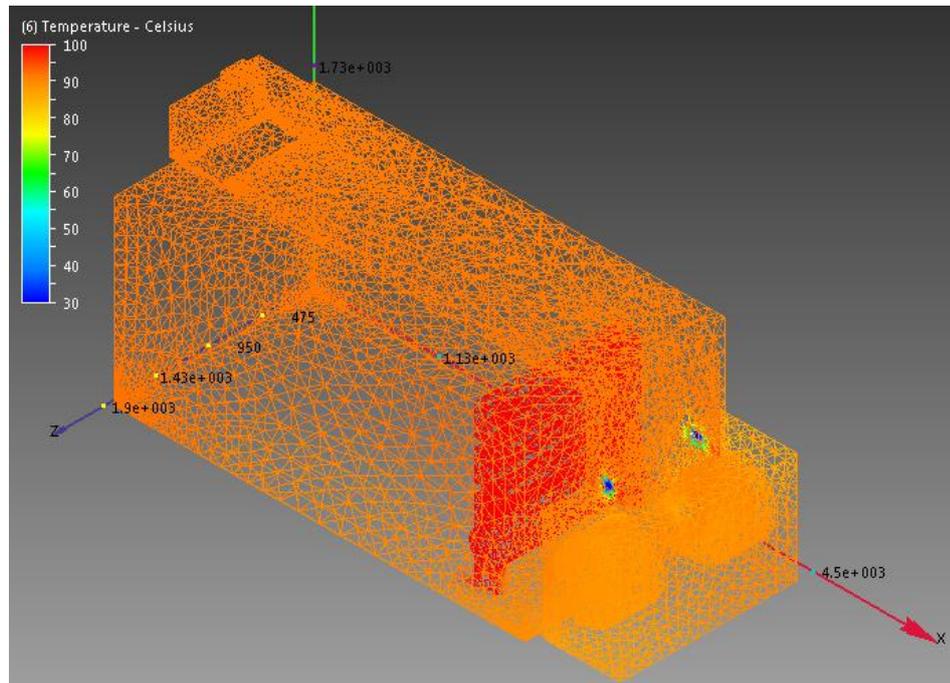
El flujo de aire que pasa a través de las bandejas es insignificante comparado con el que pasa tanto debajo de los carritos como por encima.

3.5.9 Equilibrio de temperatura en el horno deshidratador

Mediante la simulación se pudo constatar el equilibrio de temperatura que existe en todo el horno teniendo un rango de variación de $\pm 5^\circ$ la temperatura de funcionamiento la cual se observa en el gráfico N.- 3.15.

No se analizará parámetros de temperatura en el deshidratador, ya que de manera experimental ha sido posible determinar que la temperatura en la cámara del equipo es constante.

Gráfico N.- 3.15 Distribución de temperatura en el deshidratador



Elaborado por: Hugo Muñoz

3.5.10 Conclusiones de la simulación del diseño

- Los resultados obtenidos con el simulador da una coherencia con los datos conseguidos experimentalmente, midiendo la humedad de las bandejas detallada en la Tabla N.- 2.3, en la cual se tiene un producto con una humedad muy baja en la bandeja inferior (14), una humedad relativamente baja en la bandeja superior (1) y una humedad alta en la bandeja de la mitad (7).
- En las gráficas de cada plano se observa claramente una velocidad del aire mayor sobre las bandejas inferiores y superiores, en cambio la velocidad del aire es menor en las bandejas del medio.

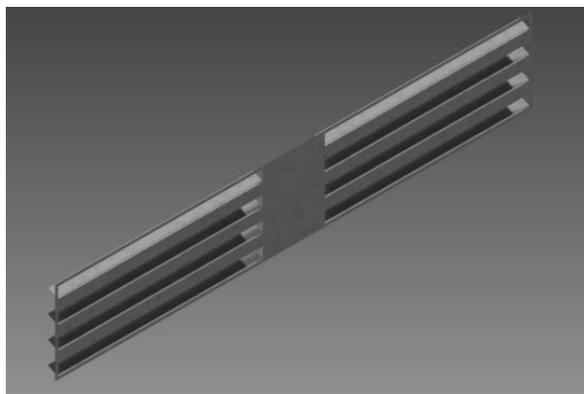
- El aire en movimiento absorbe vapor de agua de la superficie del alimento, previniendo la creación de una atmósfera saturada. La velocidad del aire actúa aumentando los coeficientes globales de transmisión de calor y de masa, disminuyendo el tiempo de secado cual es irregular en este equipo debido a las distintas velocidades que se manejan de extremos marcados en algunos casos.
- Actualmente el deshidratador opera con el 73% de sus bandejas con una velocidad de aire entre 0.8 a 1.5 m/s, con el cual el sistema se rige para determinar su velocidad de deshidratado.

3.6 Rediseño

Debido a la necesidad de cambiar las condiciones del medio de deshidratado, se decide incorporar un deflector para que el flujo de aire en la cámara del equipo sea regular en el mayor número de bandejas.

Para este equipo se ha diseñado algunos deflectores para comprobar la eficacia de estos en el momento de direccionar el aire, siendo un deflector tipo rejilla el que parcialmente solucionara el problema de distribución del flujo de aire y transferencia de calor dentro del horno como se puede ver en el gráfico N.- 3.16.

Gráfico N.- 3.16 Diseño del deflector rejilla



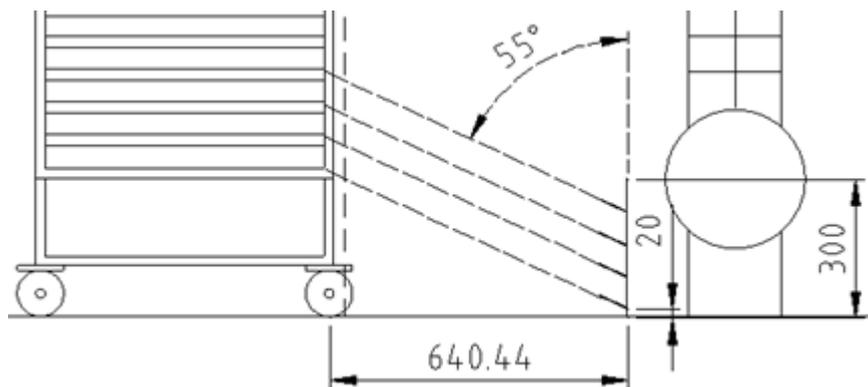
Elaborado por: Hugo Muñoz

3.6.1 Análisis de las aletas del deflector rejilla

Este deflector tipo rejilla permitirá que el aire se eleve hacia todo el primer tramo de bandejas como se podrá observar posteriormente en cada plano, obteniéndose como resultado un flujo uniforme de aire en cada bandeja.

La inclinación de las rejillas están calculadas para que el aire incida desde la bandeja 15 hasta la bandeja 10, este cálculo se lo hace a través de la representación en Autocad como se muestra en el gráfico N.- 3.17.

Gráfico N.- 3.17 Ángulo de inclinación de las aletas del deflector (dimensiones en mm)



Elaborado por: Hugo Muñoz

3.6.2 Análisis estructural del deflector rejilla

El material del deflector será chapa de acero inoxidable 304 de 2 mm de espesor con aletas soldadas, el cual está simplemente apoyado como se muestra en el gráfico N.- 3.17 y en los anexos posteriores.

Debido a que la rejilla está apoyada sobre su perfil en el piso de la cámara se calculará la presión ejercida por el aire sobre su cara completa (sin considerar las aletas ni los canales).

Se analiza con una velocidad del aire de 16 m/s los cuales están pasando a través de la rejilla permanentemente durante las horas que requiera el deshidratado para cada producto.

La densidad del aire en la zona a estudiar es de 0.9931 kg/m^3 .

Con estos datos se encuentra la presión dinámica del viento con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Con los datos obtenidos se tiene que:

$$q = 127.11 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 127.11 \text{ pa}$$

Esta presión dinámica es equivalente a la presión estática por lo que:

$$q = p = 127.11 \text{ pa} = 12.96 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Para conocer la fuerza puntual aplicada sobre el deflector rejilla se lo hace con la siguiente ecuación:

$$F = A \cdot p \quad \text{Ecuación 3.2}$$

El área de la sección rectangular es:

$$A = 1.68 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$$

$$A = 0.504 \text{ m}^2$$

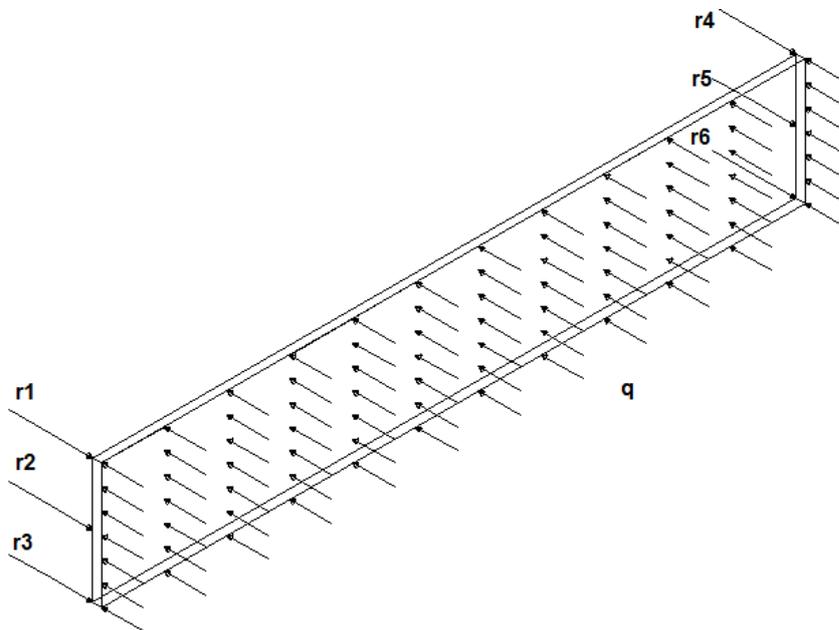
Con el área y la presión se halla la fuerza aplicada

$$F = 6.53 \text{ kgf}$$

Los tornillos cuyo diámetro nominal es de 6 mm, grado 2 (acero bajo en carbono) fallan a los 300 lb, eso quiere decir que fallaría con un esfuerzo cortante de 136,38 kgf, para el caso mencionado se tendrá 6 tornillos a cada lado soportando un esfuerzo cortante de 6,53 kgf.

En el diagrama de cuerpo libre se observa la distribución de las cargas de la rejilla.

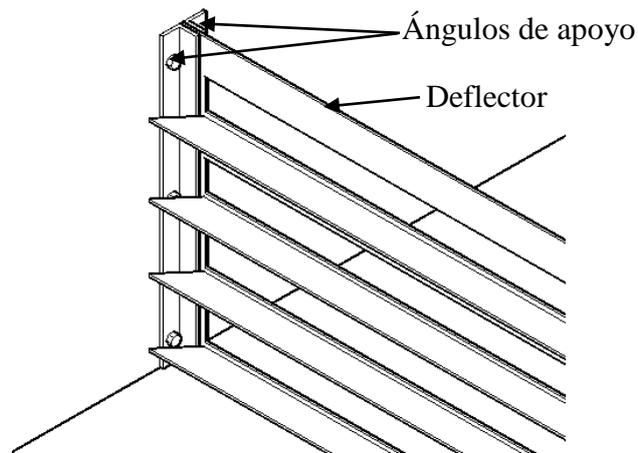
Gráfico N.- 3.18 Diagrama cuerpo libre rejilla



Elaborado por: Hugo Muñoz

La rejilla de acero inoxidable tiene una sección de 2 mm y un largo de 1680 mm, para una temperatura máxima de 100 °C, esta no se podrá pandear por la temperatura ni por la carga de 6,53 kgf.

Gráfico N.- 3.19 Apoyo del deflector en el deshidratador



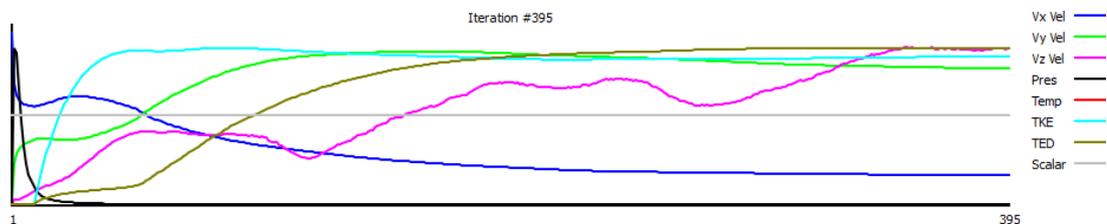
Elaborado por: Hugo Muñoz

3.6.3 Convergencia del Rediseño

El rediseño tiene una convergencia mucho más rápida que en el diseño, ya que al direccionar el aire a través de las bandejas, este llega más rápido a su estado de flujo estable.

En el gráfico N.- 3.20 se observa la convergencia en el rediseño en la iteración 395.

Gráfico N.- 3.20 Convergencia de iteraciones en el rediseño



Elaborado por: Hugo Muñoz

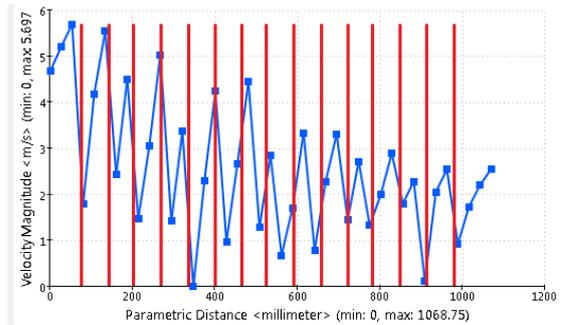
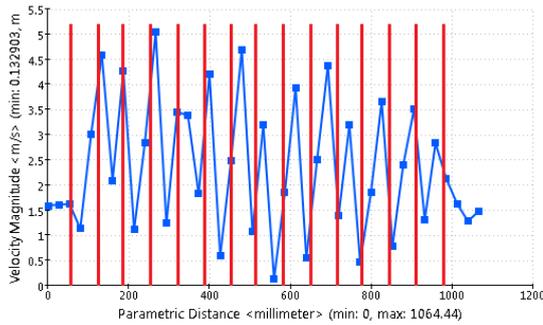
3.6.4 Análisis de los planos en el eje X

Plano X en la posición 0,49

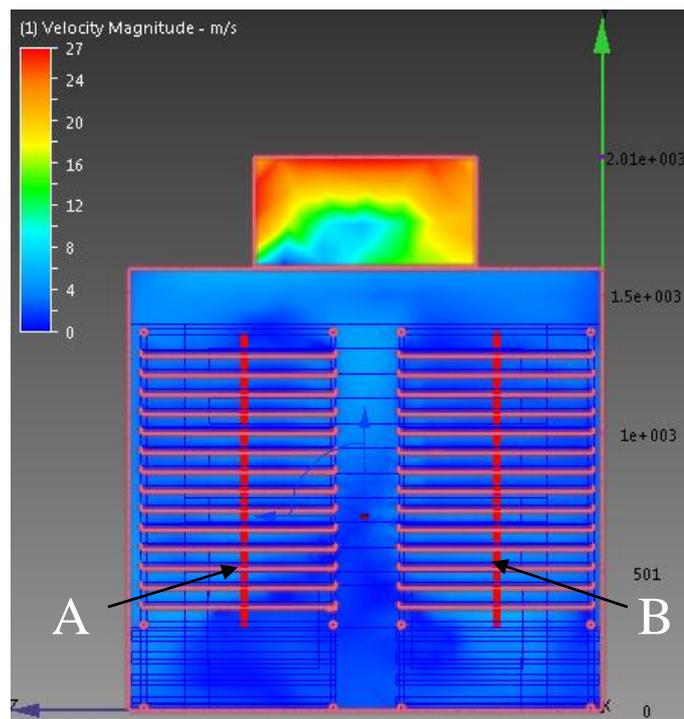
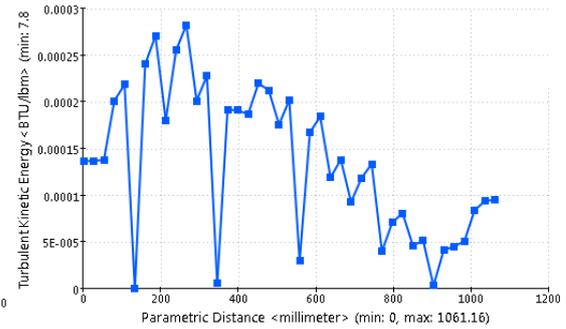
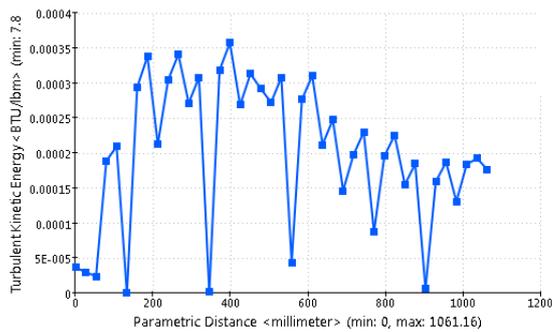
Sección A

Sección B

Velocidad del Aire



Energía Cinética Turbulenta

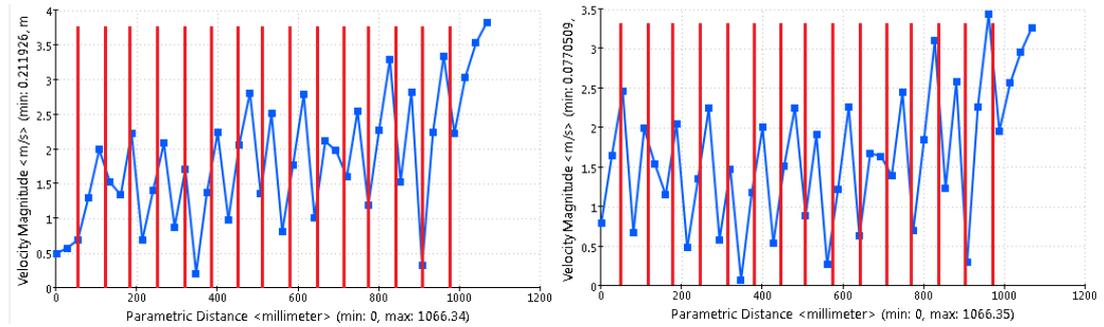


Plano X en la posición 0,29

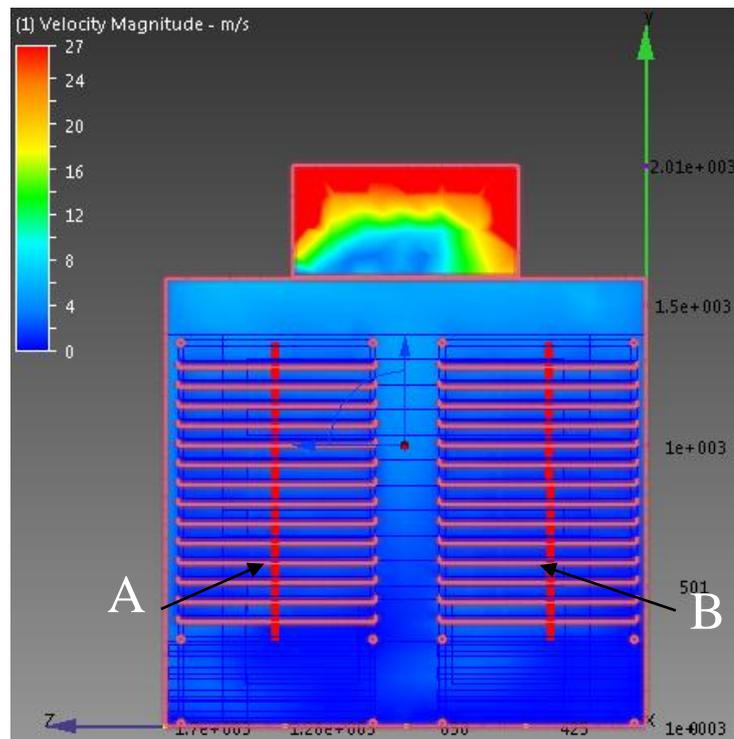
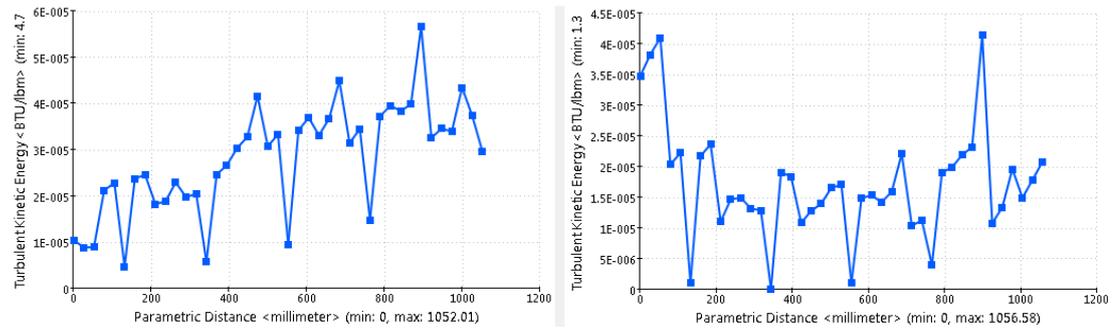
Sección A

Sección B

Velocidad del Aire



Energía Cinética Turbulenta

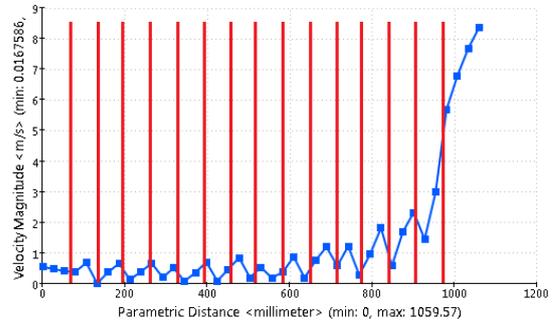
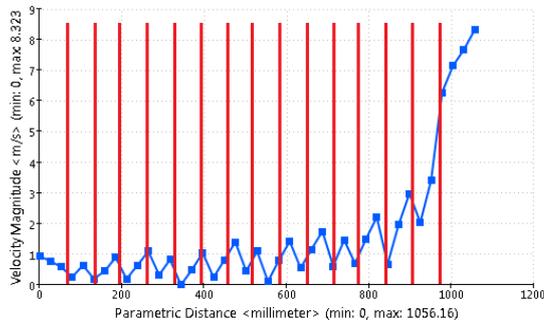


Plano X en la posición 0,09

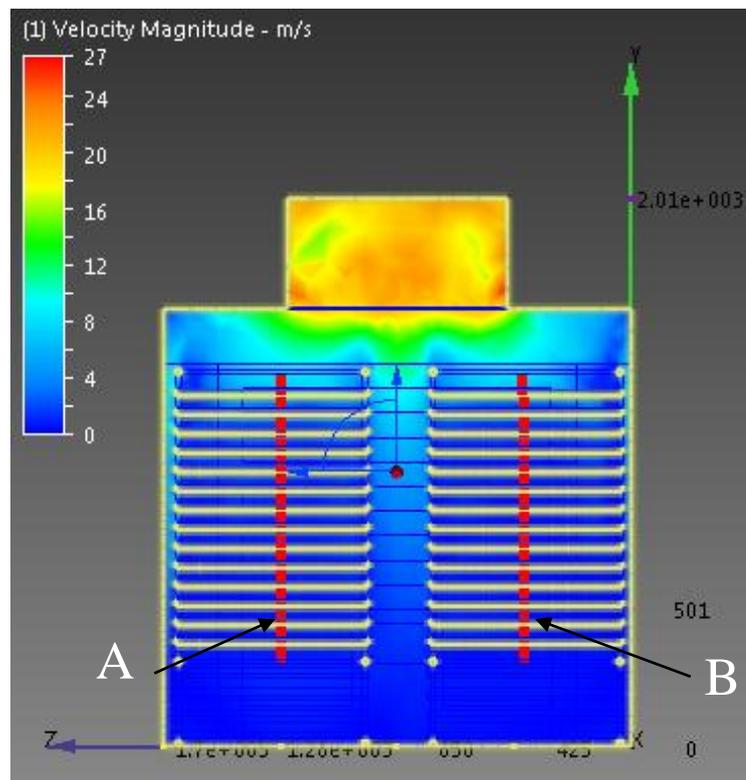
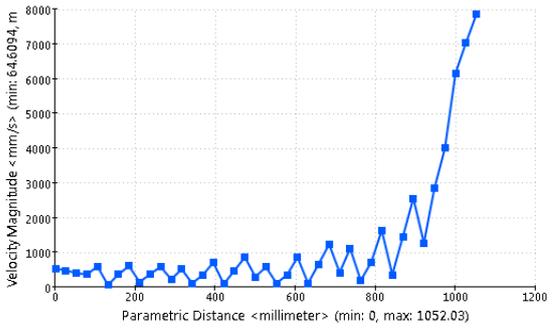
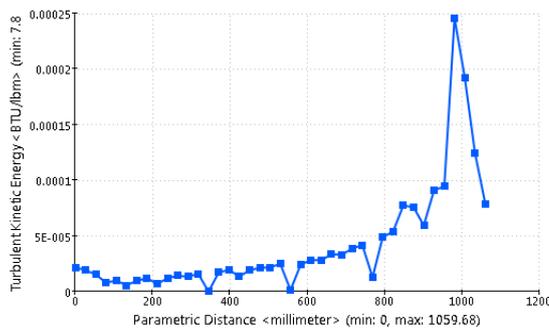
Sección A

Sección B

Velocidad del Aire



Energía Cinética Turbulenta

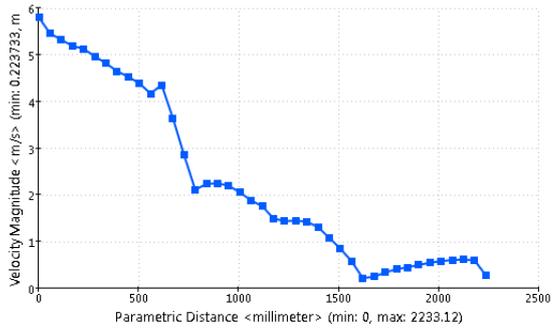


3.6.5 Análisis de los planos en el eje Z

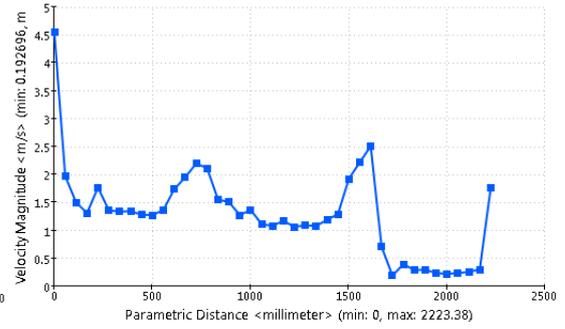
La incidencia del aire para la representación gráfica es de derecha a izquierda.

Plano Z en la posición 0,25

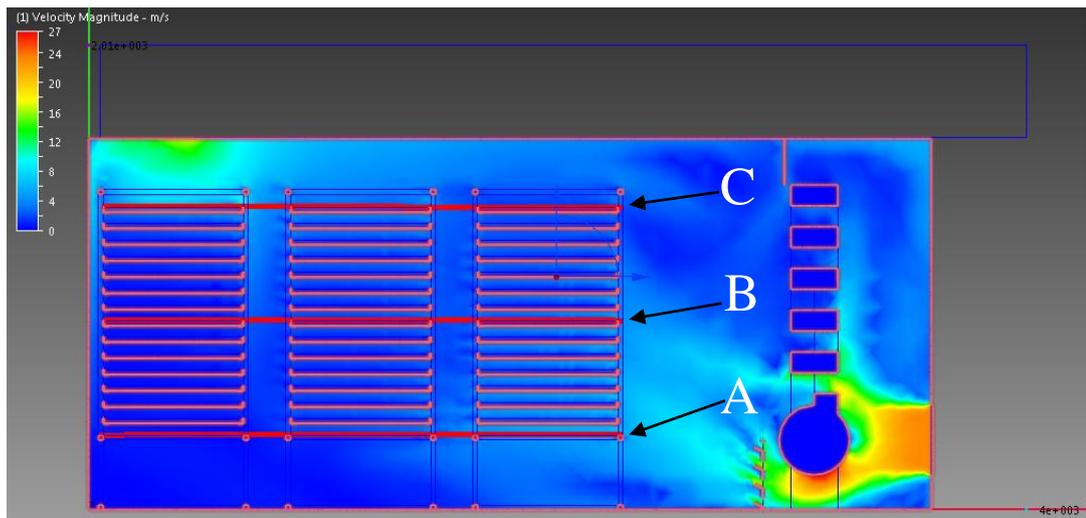
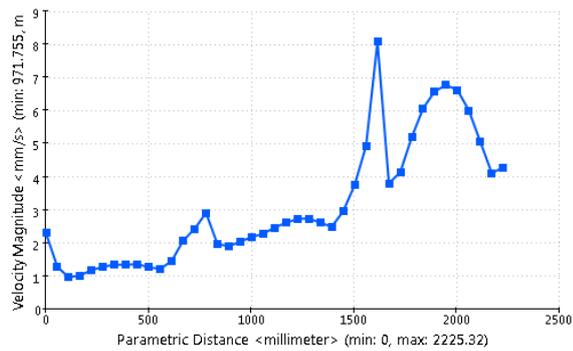
Sección A



Sección B

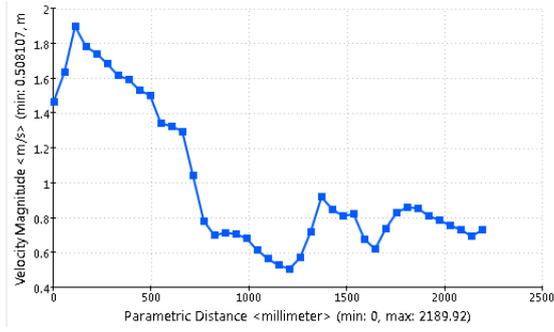


Sección C

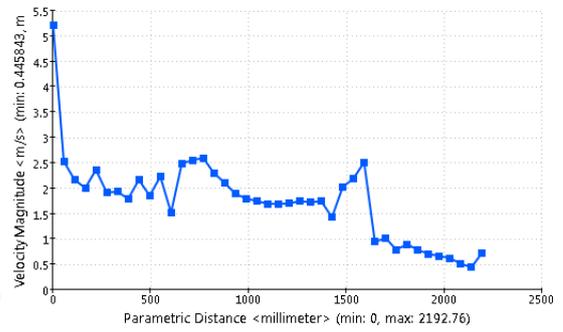


Plano Z en la posición 075

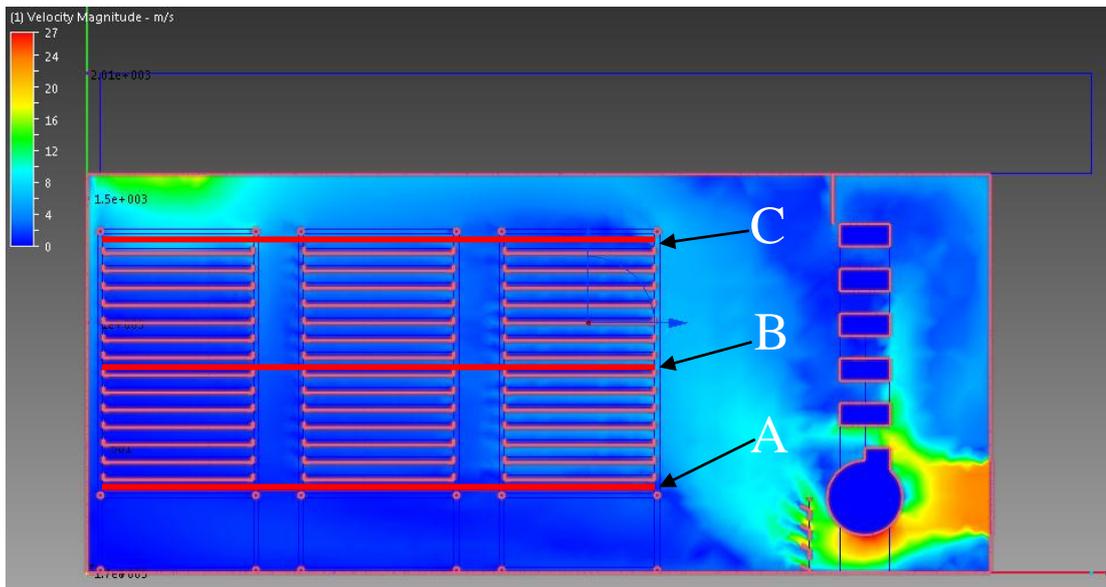
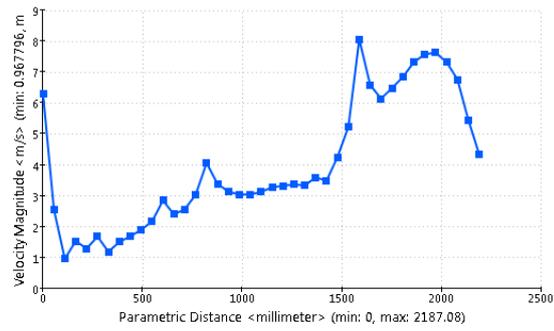
Sección A



Sección B

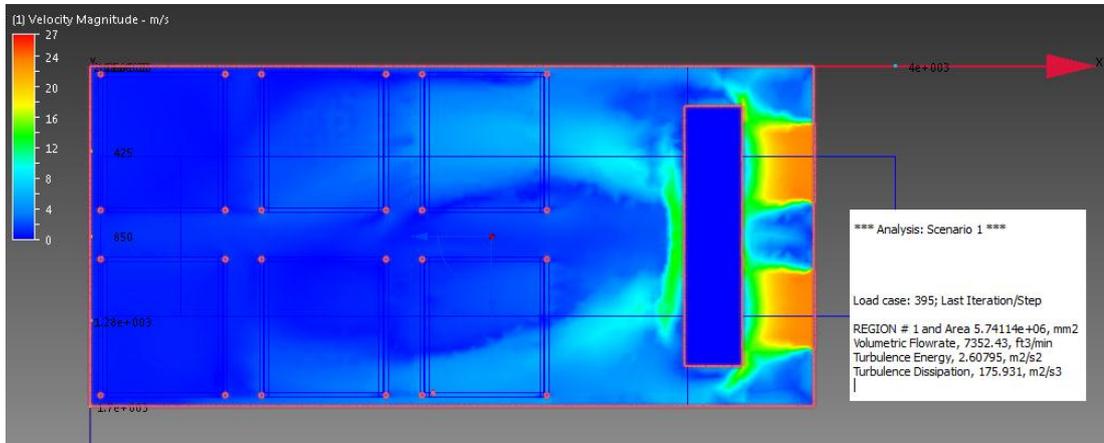


Sección C

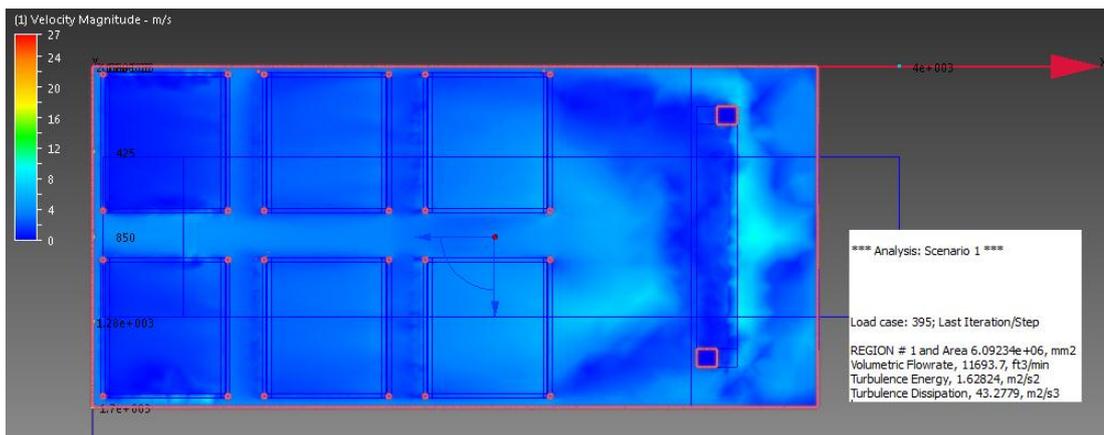


Plano Y

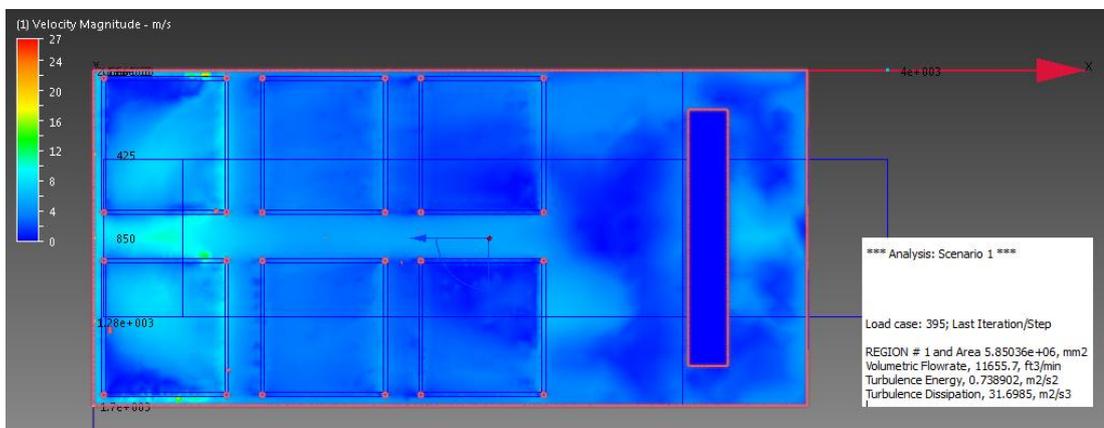
Sección A



Sección B



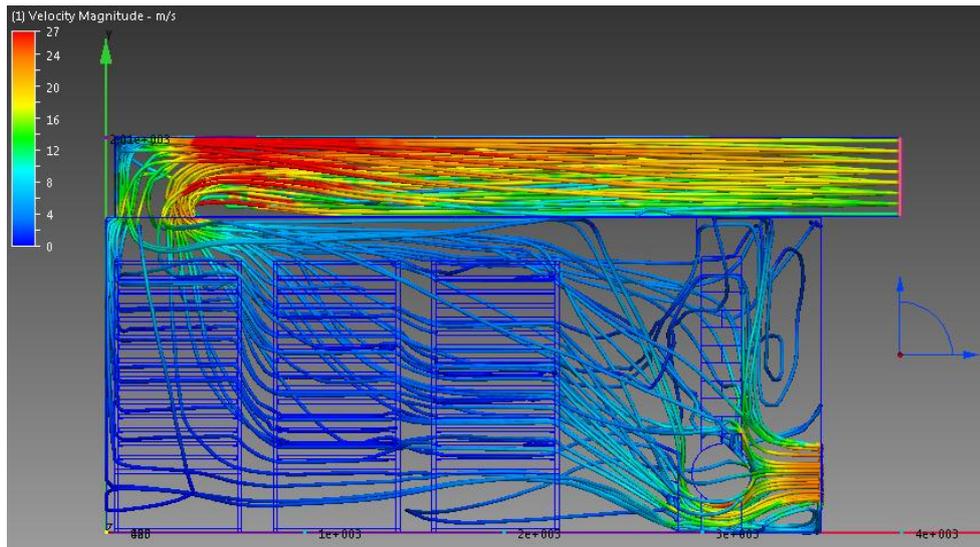
Sección C



3.6.6 Representación de trazos

El flujo de aire pasa a través de todas las bandejas constantemente, se puede observar que hay una mejor incidencia del aire en el último carrito ubicado en el plano X ubicación 0.09 como indica el gráfico N.- 3.21

Gráfico N.- 3.21 Representación de trazos rediseño



Elaborado por: Hugo Muñoz

3.6.7 Comparación de resultados

Los resultados del diseño y rediseño son tomados de las simulaciones realizadas, en este caso se hace una comparación de la velocidad del aire y la energía cinética turbulenta en el plano X donde inciden directamente sobre las bandejas en los carritos en la posición 0.49, 0.29 y 0.09 que se ubican en la mitad de la bandeja.

Tabla N.- 3.3 Comparación de resultados velocidad del aire

	Diseño	Rediseño	% Incremento
Velocidad del Aire x 0,49	0,8 m/s - 1,5 m/s	2 m/s - 3 m/s	54
Velocidad del Aire x 0,29	0,1 m/s - 1 m/s	1,5 m/s - 2 m/s	68
Velocidad del Aire x 0,09	0,5 m/s - 1 m/s	0,8 m/s - 1,2 m/s	25

Elaborado por: Hugo Muñoz

Tabla N.- 3.4 Comparación de resultados energía cinética turbulenta

	Diseño	Rediseño
Energía cinética turbulenta x 0,49	5×10^{-5} BTU/lbm	3.5×10^{-4} BTU/lbm
Energía cinética turbulenta x 0,29	4×10^{-5} BTU/lbm	5×10^{-5} BTU/lbm
Energía cinética turbulenta x 0,09	5×10^{-5} BTU/lbm	4×10^{-5} BTU/lbm

Elaborado por: Hugo Muñoz

Como se puede observar en la Tabla N.- 3.3, el aire tiene una mayor velocidad en todas las bandejas en el rediseño, la cual tiene una variación mínima con respecto al diseño que tiene picos en las primeras y últimas bandejas, y una velocidad muy baja en las bandejas intermedias.

En la Tabla N.- 3.4, el aire tiene una mayor energía cinética turbulenta en el primer tramo de bandejas, en los dos tramos restantes se puede observar que esta energía se comporta de igual manera tanto en el diseño como en el rediseño.

3.7 Análisis mediante la modelación matemática de la manzana

Los modelos matemáticos de deshidratado de capa delgada de la manzana fueron estudiados y verificados con datos experimentales; los experimentos fueron realizados con una temperatura entre los 40 a 80 °C, velocidad de 0.5, 1 y 2 m/s, y un grosor de la capa delgada de 2, 4 y 6 mm.

Las curvas de deshidratado se obtienen de los datos experimentales que fueron ajustados a los modelos de deshidratado de capa delgada. Los resultados mostrados en el análisis son del modelo presentado por Midilli, que es el mejor describiendo las curvas de deshidratado de las manzanas.

Los efectos de la temperatura del aire, la velocidad y el espesor son constantes del deshidratado y los coeficientes son mostrados para comparar las circunstancias del deshidratado.

El modelo matemático mostrado fue realizado por Adnan Midilli y se encuentra publicado en el libro "A NEW MODEL FOR SINGLE-LAYER DRYING" y el desarrollo a continuación es parte de una investigación publicada por la Revista de Ingeniería Agrícola Internacional (CIGR Ejournal).

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde MR = relación de humedad
 a, b = coeficientes
 k = constantes de deshidratado
 t = tiempo de deshidratado
 n = número de constantes en el modelo

Tabla N.- 3.5 Resultados estadísticos del modelo de Midilli, sus constantes y coeficientes a diferentes condiciones de deshidratado

Temp (°C)	V (m/s)	Thick (mm)	a	k (h ⁻¹)	n	b (h ⁻¹)	
40	0.5	2	0.981409	0.005752	1.137005	-0.000009	
		4	0.986153	0.004651	1.043105	0.000000	
		6	0.977963	0.002967	1.033864	-0.000022	
	1	2	0.975720	0.005866	1.165685	-0.000002	
		4	0.978295	0.004396	1.070790	0.000015	
		6	0.985893	0.003039	1.003515	-0.000009	
	2	2	0.984666	0.007448	1.150785	0.000041	
		4	0.993037	0.007078	0.958842	-0.000081	
		6	0.994124	0.006249	0.915147	-0.000021	
	50	0.5	2	0.971079	0.008159	1.217684	0.000063
			4	0.981287	0.004761	1.126114	0.000000
			6	0.998966	0.006679	0.950992	-0.000078
1		2	0.982535	0.006629	1.212711	-0.000018	
		4	0.979208	0.004044	1.137975	0.000001	
		6	0.994668	0.005142	0.997791	-0.000028	
2		2	1.009834	0.016955	1.050446	-0.000222	
		4	0.991306	0.008164	1.037219	-0.000079	
		6	0.996370	0.006808	0.973283	-0.000044	
60		0.5	2	0.966514	0.006854	1.336740	0.000109
			4	0.987042	0.005783	1.150246	0.000000
			6	0.996025	0.006957	1.002518	-0.000083
	1	2	0.975885	0.007253	1.287832	0.000111	
		4	0.990349	0.00687	1.097581	-0.000063	
		6	0.993441	0.005552	1.046675	-0.000067	
	2	2	0.994560	0.013282	1.167777	-0.000354	
		4	1.004158	0.009893	1.048527	-0.000198	
		6	0.994055	0.007710	1.013391	-0.000032	
	70	0.5	2	0.980264	0.012573	1.255762	-0.000106
			4	0.973446	0.003984	1.280025	0.000000
			6	0.991111	0.004757	1.154594	-0.000060
1		2	0.985945	0.011776	1.275746	-0.000198	
		4	0.976638	0.005268	1.224081	-0.000009	
		6	0.993155	0.005676	1.095576	-0.000084	
2		2	0.990608	0.020905	1.172071	-0.000079	
		4	0.987013	0.007052	1.193110	0.000019	
		6	0.990987	0.006467	1.092407	-0.000070	
80		0.5	2	0.993264	0.011251	1.301372	-0.000708
			4	0.981582	0.005205	1.279897	-0.000166
			6	0.971848	0.003696	1.277096	0.000003
	1	2	0.975321	0.010417	1.327375	-0.000230	
		4	0.993481	0.011032	1.147379	-0.000123	
		6	1.003355	0.009115	1.072081	-0.000083	
	2	2	1.000955	0.025247	1.135096	-0.000092	
		4	0.991068	0.014776	1.102151	-0.000034	
		6	0.990221	0.009626	1.071738	-0.00013	

$$\frac{M}{M_0} = a \exp(-kt^n) + bt$$

Elaborado por: Facultad de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Teherán

3.7.1 Resultados del modelo matemático

Los resultados expuestos se pueden considerar para el análisis global del horno deshidratador ya que el comportamiento del producto en un horno con condiciones ideales puede extenderse para hornos con aplicaciones industriales.

Se debe considerar también que la velocidad del aire disminuye considerablemente durante el paso por las bandejas como se puede ilustrar en los planos de eje X en las posiciones 0.49, 0.29 y 0.09.

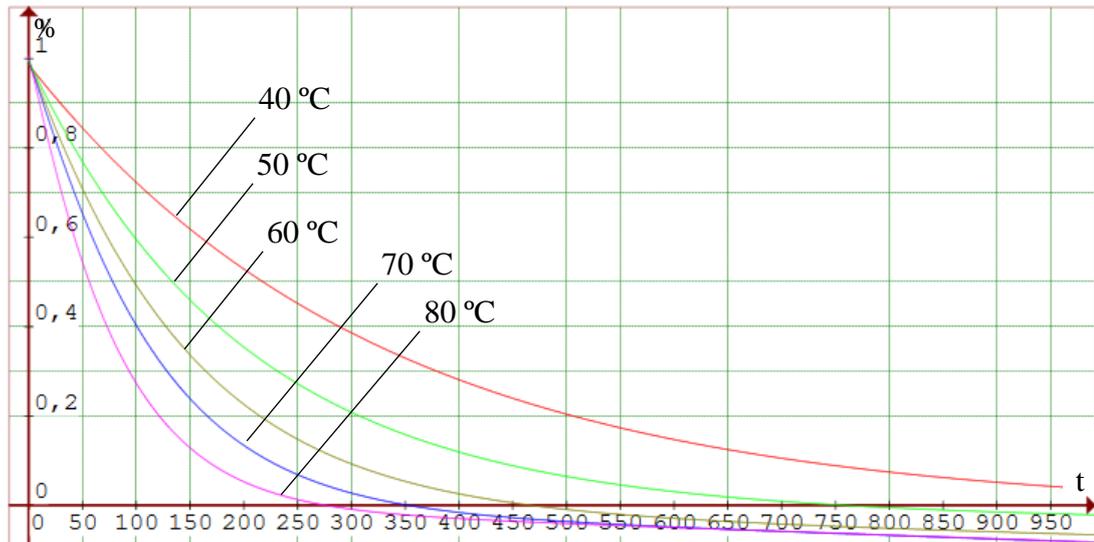
Para obtener datos que se acerquen a la realidad del horno se considerará la velocidad de secado máxima en el eje X posición 0.29 y con temperaturas de deshidratado de 40, 50, 60, 70 y 80 °C para el caso de diseño y rediseño de manera que se pueda hacer una comparación cuantitativa.

La AOAC (Association of Official Agricultural Chemists), establece que el porcentaje de deshidratado que deben tener las manzanas para poder preservarlas es del 20%, sin embargo la empresa Agroapoyo baja el porcentaje de humedad entre el 15 al 18% para poder preservar por más tiempo el producto.

Las curvas relación de humedad vs tiempo se describen en los siguientes gráficos:

Gráfico N.- 3.22 Curvas Relación de humedad (%) vs Tiempo (min) a 1 m/s

Graphmatica 2.2e © 2013 kSoft - Vel 1ms.gr



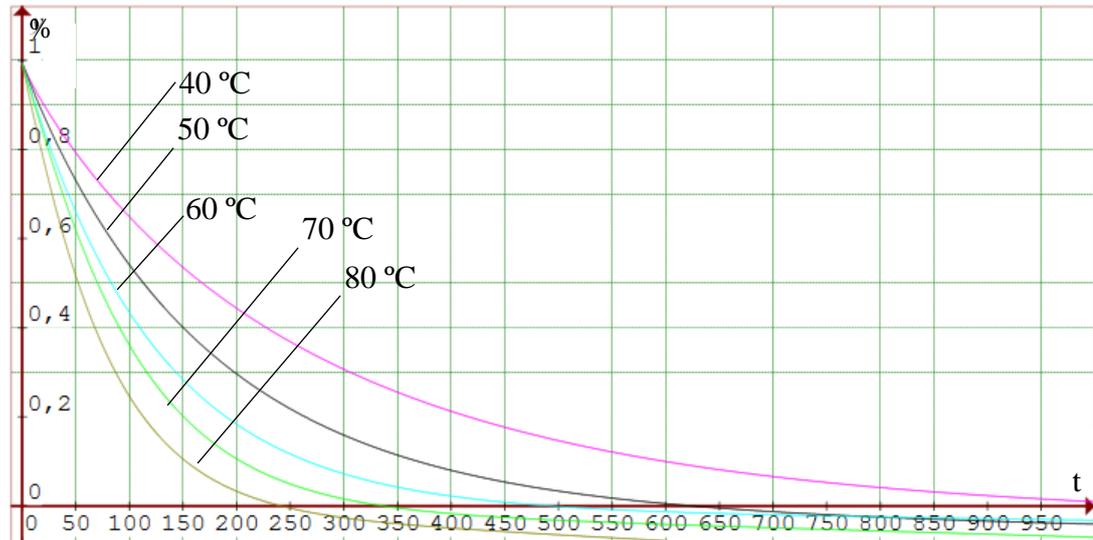
Ecuaciones en pantalla:

1. $y=0.985893*\exp(-0.003039*x^{1.003515})+(-0.000009*x)$
2. $y=0.993441*\exp(-0.005552*x^{1.046675})+(-0.000067*x)$
3. $y=0.993155*\exp(-0.005676*x^{1.095576})+(-0.000084*x)$
4. $y=1.003355*\exp(-0.009115*x^{1.072081})+(-0.000083*x)$
5. $y=0.994668*\exp(-0.005142*x^{0.997791})+(-0.000028*x)$

Elaborado por: Hugo Muñoz

Gráfico N.- 3.23 Curvas Relación de humedad (%) vs Tiempo (min) a 2 m/s

Graphmatica 2.2e © 2013 kSoft - Vel 2ms.gr



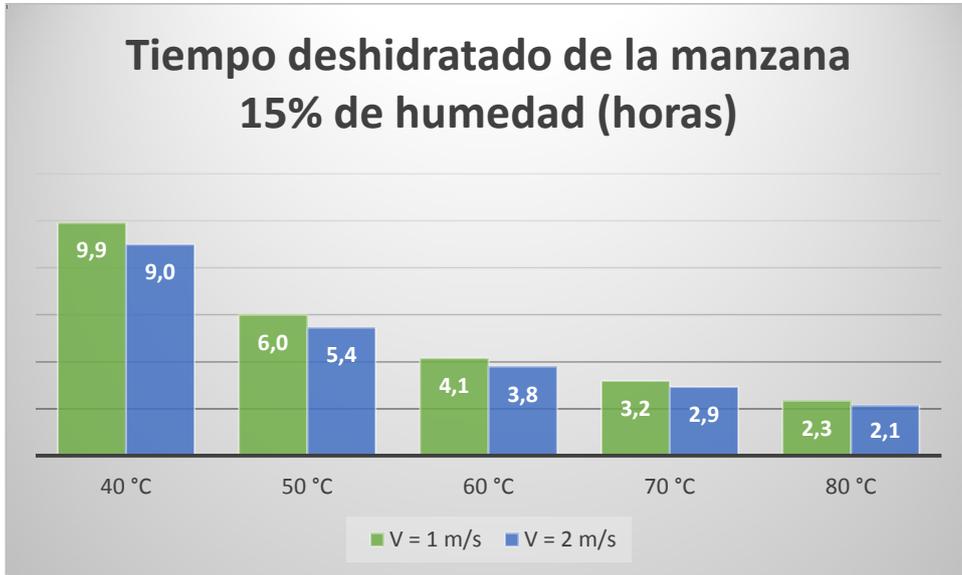
Ecuaciones en pantalla:

1. $y=0.994124*\exp(-0.006249*x^{0.915147})+(-0.000021*x)$
2. $y=0.996370*\exp(-0.006808*x^{0.973283})+(-0.000044*x)$
3. $y=0.994055*\exp(-0.007710*x^{1.013391})+(-0.000032*x)$
4. $y=0.990987*\exp(-0.006467*x^{1.092407})+(-0.000070*x)$
5. $y=0.990221*\exp(-0.009626*x^{1.071738})+(-0.00013*x)$

Elaborado por: Hugo Muñoz

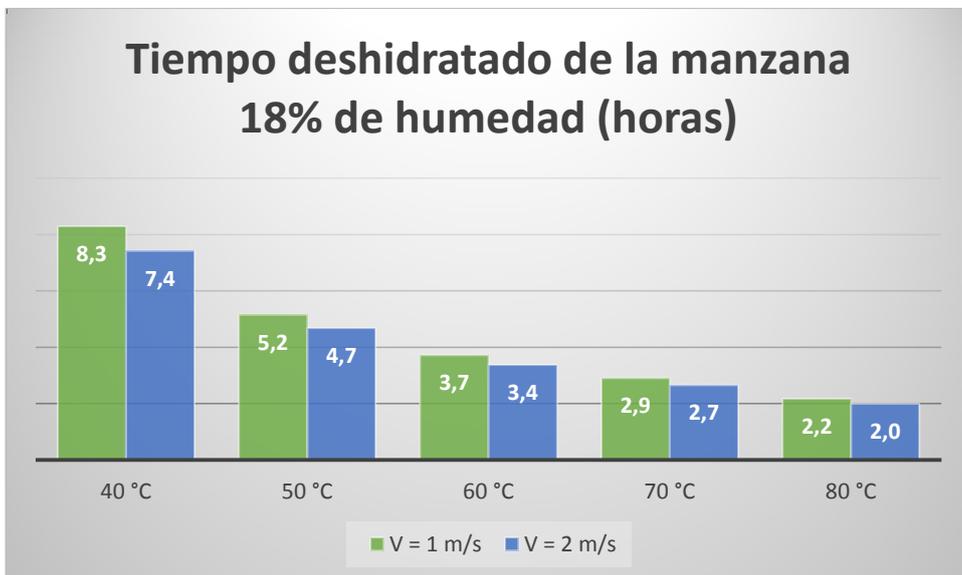
Los siguientes gráficos que se muestran a continuación hacen una comparación entre el tiempo de deshidratado del diseño y el rediseño a diferentes temperaturas.

Gráfico N.- 3.24 Tiempo de deshidratado con 15% de humedad



Elaborado por: Hugo Muñoz

Gráfico N.- 3.25 Tiempo de deshidratado con 18% de humedad



Elaborado por: Hugo Muñoz

3.7.2 Utilización de energía en el deshidratado por aire caliente

En el deshidratado por aire caliente, la energía total de utilización está dado por el soplado de aire caliente mediante un blower y una fuente de calor. Esta se calcula a partir de la ecuación a continuación. (MOTEVALLI, 2011):

$$E_u = \rho_a A v C_{pa} \Delta T \cdot t \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

E_u = Energía total de utilización	[kWh]
ρ_a = Densidad del aire a mayor temperatura	[kg/m ³]
A = Sección transversal de la cámara donde se colocan las muestras	[m ²]
V = Velocidad del Aire	[m/s]
C_{pa} = Calor específico del aire a presión constante	[kJ/kg °C]
ΔT = Diferencia de temperatura de entrada y de salida	[°C]
T = Tiempo total de deshidratado	[h]

La energía de utilización se determinará con las condiciones de entrada al horno deshidratador descritas en la tabla N.- 3.6, la sección del área transversal por donde atraviesa el fluido sobre las bandejas es de 1,05 m².

Tabla N.- 3.6 Energía total de Utilización para velocidad de 1 y 2 m/s

pa	A (m ²)	V (m/s)	Cpa	DT (°C)	t (h)	Eu
1,127	1,05	1	1,010	10	9,9	118,43 kW/h
1,127	1,05	1	1,010	20	6,0	143,39 kW/h
1,127	1,05	1	1,010	30	4,1	148,54 kW/h
1,127	1,05	1	1,010	40	3,2	152,01 kW/h
1,127	1,05	1	1,010	50	2,3	139,69 kW/h

pa	A (m ²)	V (m/s)	Cpa	DT (°C)	t (h)	Eu
1,127	1,05	2	1,010	10	9,0	214,65 kW/h
1,127	1,05	2	1,010	20	5,4	260,51 kW/h
1,127	1,05	2	1,010	30	3,8	271,86 kW/h
1,127	1,05	2	1,010	40	2,9	279,19 kW/h
1,127	1,05	2	1,010	50	2,1	255,75 kW/h

Para satisfacer las condiciones del rediseño se requerirá un quemador de 800000 BTU/h

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El problema de ineficacia del horno deshidratador se debe a que no existe direccionamiento del aire para que fluya directamente sobre las bandejas y no sobre espacios libres dentro de la cabina.
- Haber encontrado el problema del flujo de aire dentro del horno deshidratador, hace que este trabajo se enfoque exclusivamente a buscar métodos experimentales y analíticos que evalúen el flujo de aire en la cámara.
- La evaluación experimental se realizó a través de la medición de humedad de pimienta roja sobre las bandejas en zonas críticas, obteniéndose como resultado una deshidratación irregular en un tiempo determinado.
- La evaluación del diseño del deshidratador se lo realizó mediante un software basado en la simulación de flujo de aire cuyas referencias en el ámbito científico son aprobadas.
- El uso del modelo matemático de las rebanadas de manzana permitió tener un panorama más amplio de lo que sucede con un producto dentro del deshidratador y la mejora que se obtiene a partir de este.
- Con una adecuada distribución del aire dentro de la cámara se ha solucionado el problema, hallándose a partir de esta solución un nuevo problema que es el encontrar que no hay la suficiente energía de utilización disponible para deshidratar el producto ya que el quemador otorga 400.000 BTU/h lo que

equivale a 117,23 kWh, obteniéndose como resultado una falta de energía para deshidratar en el tiempo calculado.

- Con la implementación del deflector se reduciría el proceso de cambio de bandejas en el carrito ya que se tiene un flujo de aire similar en todas las bandejas, no obstante se debe realizar el cambio de posición del carrito en la cámara del deshidratador debido a los cambios de velocidades que se presentan en cada sección como se puede observar en los planos de simulación en el eje X del rediseño.
- El modelo de la manzana únicamente se ajusta para este fruto, para la gran variedad de frutos que maneja la empresa Agroapoyo, se debe manejar los modelos que cada fruto requiera, por lo que los tiempos de deshidratado y la energía utilizada variarían.

RECOMENDACIONES

- Manejar los productos catalogados en base a su cantidad de agua y a su constitución permitirá establecer procesos adecuados para cada grupo de productos.
- El sellado de fugas en el deshidratador permitirá aumentar la eficacia del horno debido a la cantidad de calor que se disipa, y el flujo de aire en la cámara que se reduce.
- El uso de la rejilla debe considerarse como una alternativa a corto plazo que debe ser implementada, al ser de fácil construcción y fácil implementación.

- Si se efectúa el uso de la rejilla, se debe marcar el piso de la cámara del deshidratador para que los carritos lleguen al límite establecido para que se haga efectiva la mejora.
- Se recomienda el uso de software de simulación CDF para determinar las mejores alternativas cuando se trabaja con flujo de aire o flujo de calor, como es en el casos de sistemas de hornos, aire acondicionado, cámaras de pintura, etc.
- Se recomienda el uso de bandejas perforadas para una mejor distribución del aire.

BIBLIOGRAFÍA

- DALFSEN, B. V. (1999). Agriculture building systems handbook: cabinet dryer.
- DEVAHASTIN, S. (2000). *Mujumdar's practical guide to industrial drying principle, equipment and new develop.*
- FERNÁNDEZ, J. (2003). Tecnología de los Alimentos: Universidad del Almería.
- KREITH/BOHN. (2001). *Principios de Transferencia de Calor* (6 ed.). México: Thomson Learning.
- MAUPOEY, P. F., GRAU, A. M. A., & BAVIERA, J. M. B. (2001). Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- MIDILLI, A., H. KUCUK AND Z. YAPAR. (2002). A new model for single layer drying of some vegetables. *Drying Technology*, 20, 1503-1513.
- MOTEVALI, A., S. MINAEI AND M.H. KHOSHTAGAZA. 2011. Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energ Convers. Manage.*, 52: 1192-1199.
- MUJUMDAR, A. S. (1995). *Handbook of Industrial Drying* (2nd ed. Vol. I). Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.
- MUJUMDAR, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying* (3rd ed.): CRC Press.
- SINGH, R. P., & HELDMAN, D. T. (1997). *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos*. España: Acribia.
- TANTHAPANICHAKOON, W. (2002). *Quality and energy efficiency improvement of and industrial tray dryer*. Paper presented at the 13th International Drying Symposium, Beijing, China.
- TECANTE, A. (2010). FUNDAMENTOS DE SECADO, EXTRACCION SOLIDO-LIQUIDO Y DESTILACION.
- UNIVERSITY, OHIO. S. (2000). Water Activity.
- www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r46891.PDF

ANEXO N.- 1 Curvas de deshidratado de algunos productos

Fuente: (MUJUMDAR, 2006, p. 19)

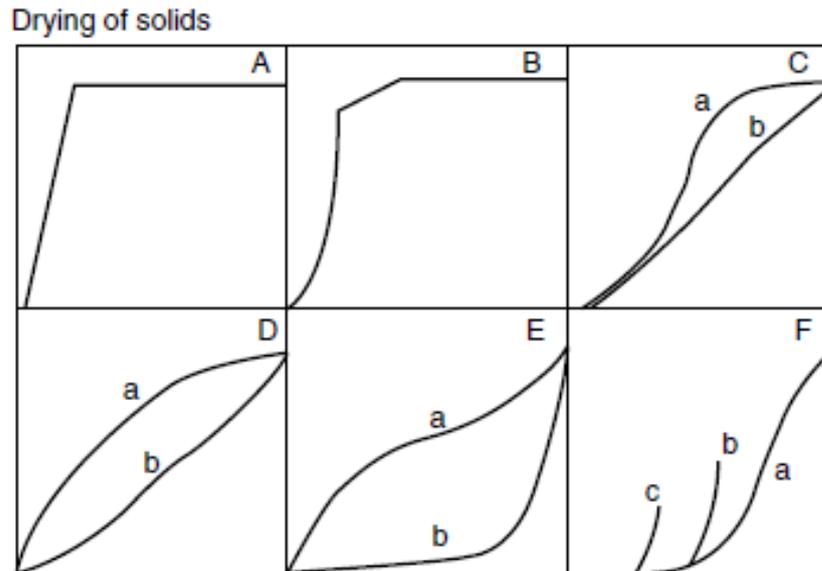


FIGURE 1.16 Examples of normalized drying rate curves for different types of media: (A) sand, clay, silica gel, paper pulp, leather; (B) sand, plastic-clay mix, silica-brick mix, ceramic plate, leather; (C) [a] fir wood and [b] Cyprus wood; (D) [a] paper, wool, and [b] potatoes, tapioca tuber, rice flour; (E) [a] rye bread, yeast, and [b] butter and margarine; (F) [a] wheat corns, [b] and [c] represent curves at lower values of initial moisture.

ANEXO N.- 2 Propiedades organolépticas de los alimentos

Fuente: (FERNÁNDEZ, 2003)

Característica	Característica	Calificativos
Primaria	Secundaria	normalmente empleados
Características mecánicas		
Dureza		Blando-firme-duro
Cohesividad	Quebradizo	Desmenuzable, crujiente, quebradizo
	Madurabilidad	Blando, masticable, correoso
	Gomoso	Corto, harinoso, pastoso, gomoso
Viscosidad		Fluido, Viscoso
Elasticidad		Plástico, elástico
Adhesividad		Pegajoso, pegadizo
Características Geométricas		
Tamaño y forma de partícula		Arenoso, granujiento
Tamaño y orientación de las partículas		Fibroso, celular, cristalino
Otras características		
Contenido en agua		Seco-húmedo-mojado-acuoso
Contenido graso	Aceitosidad	Aceitoso
	Grasosidad	Grasiento

ANEXO N.- 3 Tiempo de permanencia de diferentes deshidratadores

Fuente: (MUJUMDAR, 2006, p. 21)

	Tiempo típico de permanencia entre deshidratadores				
	0--10 (seg)	10--30 (seg)	5--10 (min)	10--60 (min)	1--6 (h)
Convección					
Deshidratador de cinta transportadora				X	
Deshidratador instantáneo	X				
Deshidratador de lecho fluidizado				X	
Deshidratador rotatorio				X	
Deshidratador por pulverización		X			
Deshidratador de bandejas (por lotes)					X
Deshidratador de bandejas (continuo)				X	
Conducción					
Deshidratador de tambor		X			
Deshidratador rotatorio mediante chaqueta de vapor				X	
Deshidratador rotatorio mediante tubos de vapor				X	
Deshidratador de bandejas (por lotes)					X
Deshidratador de bandejas (continuo)				X	

ANEXO N.- 4 Fotos deshidratador





ANEXO N.- 5 Productos deshidratados que procesa la empresa Agroapoyo

Fuente: Página web Agroapoyo productos industriales

<http://www.andeanpassion.com/espanol/productos/industriales.php>

Producto	Forma
Uvilla	Entera
Manzana	Rebanadas
Pitahaya	Rebanadas
Tomate de Árbol	Rebanadas
Frutilla deshidratada	Entera
Piña deshidratada	Cubos
Orito deshidratado	Entero
Tomate riñón	Rebanadas
Papaya deshidratada	Rebanadas
Zanahoria	Cubos/picada
Cáscara Naranja	Picada
Apio	Entera
Espinaca	Entera
Perejil	Entero
Naranjilla	Rebanadas
Mandarina	Rebanadas
Pimiento	Cubos/picado
Guineo	Entero

ANEXO N.- 6 Planos