

OPTIMIZACIÓN MEDIANTE CFD DE UN CUARTO PARA SECADO DE PASTA ALIMENTICIA

JOSÉ AYANCY MARTÍNEZ ORTIZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E
INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, Abril 12 del 2022

OPTIMIZACIÓN MEDIANTE CFD DE UN CUARTO PARA SECADO DE PASTA ALIMENTICIA

JOSÉ AYANCY MARTÍNEZ ORTIZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director: JUAN CARLOS SERRANO RICO
PhD. Ingeniería Mecánica
jcserrano@unipamplona.edu.co**

**Codirector: GONZALO MORENO CONTRERAS
PhD. Ingeniería Mecánica
gmoren@unipamplona.edu.co**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E
INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, Abril 12 del 2022**

Dedicatoria

Esta tesis es dedicada:

A los miembros de mi familia que no pudieron estar para este tiempo pero que mientras estuvieron en este mundo siempre me alentaron a seguir adelante.

A mi madre, quien siempre ha estado ahí conmigo apoyándome, quien nunca dejó de creer en mí y me dio la fortaleza para seguir adelante y llegar a este punto de mi carrera como profesional.

A mi familia, quienes de una u otra forma me apoyaron a lo largo de este proceso y siempre tuvieron una voz de aliento para mí, a todos y cada uno de ellos mil gracias.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios, por darme la fuerza y sabiduría para llegar hasta este punto, por bendecir y cuidar en todo momento a mí y mi familia.

Todos y cada uno de mis compañeros y amigos que estuvieron y animaron a lo largo de este proceso.

A la Universidad de Pamplona por haberme abierto las puertas y permitirme formar como profesional.

A los docentes que se esmeraron por inculcar su conocimiento dentro y fuera de las aulas de clase a lo largo de la de mi formación como profesional.

A los docentes Juan Carlos Serrano, Gonzalo Moreno y Antonio Velazco, por asesorarme para llevar a cabo este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	10
2. Justificación.....	12
3. Objetivos	13
3.1.1 Objetivo general	13
3.1.2 Objetivos específicos	13
4. Estado actual.....	14
4.1 Materia prima para elaboración de pasta.....	14
4.2 proceso para la producción de pasta	15
4.2.1 Elaboración de la masa	15
4.2.2 Amasado	16
4.2.3 Modelado	16
4.2.4 Secado	16
4.2.5 Empaquetado.....	21
4.2.6 Almacenamiento del producto terminado.	21
4.2.7 Distribución	21
4.3 modelos matemáticos de los fenómenos físicos.	22
4.3.1.1 Presión estática, dinámica y total	23
4.3.1.2 Pérdida de carga.	23
4.3.2 Convección y Psicrometría.....	27
4.4 Proceso de Simulación.	33
4.4.1 Tipos de malla.....	34
4.4.2 Modelos de turbulencia.	35
5. Metodología.....	37
5.1 Funcionamiento actual del proceso de secado	37
5.1.1 Características del cuarto.....	38
5.1.2 Modelado y simulación.....	40
5.1.2.1 Modelado.....	41
5.1.2.2 Convergencia de malla.	44
5.1.3 Resultados de simulaciones del cuarto original.	45
5.1.3.1 Simulación del cuarto original con dos motores encendidos.	45
5.1.3.2 Cuarto original con el motor derecho encendido.	46

5.1.3.3	Ductos superiores del cuarto original.....	47
5.2	Propuestas de mejoras	48
5.2.1	Primera propuesta.....	48
5.2.1.1	Rediseño.....	48
5.2.1.2	Propuesta ducto superior.....	50
5.2.2	Segunda propuesta.....	54
5.2.2.1	Mallado para simular cuarto modificado.	58
5.2.2.2	Resultados del cuarto modificado.....	60
5.2.2.3	Simulación del cuarto modificado con dos motores encendidos..	60
5.2.2.4	Simulación del cuarto modificado con el motor derecho encendido. 60	
5.2.3	Tercera propuesta.....	61
5.2.3.1	Modificación del ducto superior.	61
5.2.3.2	Diseño del cuarto con propuestas hechas.....	62
5.2.3.3	Simulación ducto superior modificado.	63
5.2.3.4	Simulación cámara de secado modificada.	63
5.3	Perdida de energía en los ductos	64
6.	Conclusiones.....	67
7.	Recomendaciones y trabajos futuros	68
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Temperatura y tiempo de secado para pastas.....	20
Tabla 2: Modelos de turbulencia del módulo Workbench de ANSYS)(Brasil Maia et al. 2012).	35
Tabla 3: Datos tubo de Pitot.....	38
Tabla 4: Especificaciones del motor.	40
Tabla 5: Criterio de calidad Skewness.	41
Tabla 6: Criterio de calidad <i>Orthogonal Quality</i>	42
Tabla 7: Valores del estudio de convergencia de malla.	43
Tabla 8: Propiedades del fluido.....	44
Tabla 9: Datos de convergencia de malla.	44
Tabla 10: Detalles de la malla, simulación de una sola cámara.	59
Tabla 11: Valor de pérdida por sección.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación.....	17
Figura 2: Hornos de convección forzada.	19
Figura 3: Caudal, presiones y velocidad. (Aranda 2017).....	23
Figura 4: Coeficiente de KL para accesorios (Çengel and Cimbala 2006).....	26
Figura 5: Tabla de psicrometría para valores de temperatura y humedad.	29
Figura 6: Líneas de temperatura de bulbo seco °C.	30
Figura 7: Líneas de temperatura de bulbo húmedo °C.....	30
Figura 8: Líneas de temperatura de punto de rocío °C.	31
Figura 9: Líneas de humedad relativa %.	32
Figura 10: líneas de humedad absoluta en gramos.....	33
Figura 11: Tipos de malla.	34
Figura 12: Cara, salida ducto principal de velocidad.....	37
Figura 13: Medidas del cuarto de secado real (Dimensiones en cm).....	39
Figura 14: Cuarto de secado.....	40
Figura 15: Diseño del cuarto original y dominio (Medidas en cm).	41
Figura 16: Mallado del modelo original.....	43
Figura 17: Simulación cuarto con dos motores (número de partículas 100).....	46
Figura 18: Simulación cuarto con un motor (número de partículas 100).	47
Figura 19: Simulación ducto superior.	47
Figura 20: Factor de fricción para flujo laminar.	49
Figura 21: Ducto original del cuarto de secado.	51
Figura 22: Redondeo propuesto del ducto.	51
Figura 23: Simulación propuesta ducto superior.	52
Figura 24: Redondeo propuesto mejorado.	52
Figura 25: Simulación ducto redondeado.	53
Figura 26: Distribución defectuosa de las cámaras de secado.	53
Figura 27: Rediseño del cuarto de secado.....	54
Figura 28: Parte interna de ductos.....	55
Figura 29: Diseño de salida de aire del ducto.	55
Figura 30: Flujo laminar y turbulento.	56
Figura 31: Ductos en el cuarto de secado.....	57
Figura 32: Compuertas para separar las cámaras.....	58
Figura 33: Mallado del modelo modificado (dos motores).....	58
Figura 34: Mallado del modelo modificado (un motor).....	59
Figura 35: Resultado de simulación cuarto de secado (dos motores).	60
Figura 36: Simulación cuarto modificado (motor derecho).....	61
Figura 37: Propuesta de ducto con ampliación.	62
Figura 38: Modelo de cuarto con ducto ampliado.	62
Figura 39: Simulación ducto ampliado.	63
Figura 40: Simulación cámara de secado derecha (motor derecho encendido).	63
Figura 41: Secciones de perdidas en los ductos.	64

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia ha existido la necesidad de la deshidratación de los alimentos, ya sea para facilitar su conservación, transporte o comercialización, por lo cual, existe la necesidad de mejorar el proceso de extracción de humedad en diversos productos, proceso en el que se utilizan diferentes equipos, siendo uno de los más utilizados los cuartos de secado (Sorolla 2016), tema principal del presente documento.

Debido a los diversos factores que influyen en el proceso de extracción de humedad de la materia prima, como son: el tiempo de secado, la velocidad, la temperatura y la buena distribución del fluido con el que se quiere extraer la humedad, siendo esta última de gran importancia para garantizar la eficiencia del proceso de secado y calidad del producto, por ello este proyecto se centra en garantizar una distribución óptima y homogénea en las cámaras de secado del cuarto para secado de pasta alimenticia, queriendo de esta forma una mejor extracción de humedad del producto.

Actualmente existen dos tipos de cuartos de secado, los cuartos convencionales y los cuartos industriales, siendo este último el más óptimo, puesto que debido a su gran adelanto tecnológico puede generar una mejor extracción de humedad en el producto (Ploteau, Nicolas, and Glouannec 2012).

En este contexto, en la ciudad de Pamplona – Colombia se encuentra la empresa Pieros Pastas, quien se dedica a la producción de pasta alimenticia, en cuyo proceso se debe realizar el secado de la pasta, por lo que se utiliza un cuarto de secado industrial, dicho cuarto, por diferentes factores no está realizando el proceso de forma adecuada, siendo el más notorio la distribución no homogénea de aire caliente dentro de la cámara durante el proceso de secado de la pasta, puesto que se observa que la materia prima no se seca homogéneamente.

Teniendo en cuenta lo expuesto, el presente proyecto tiene como objetivo optimizar la circulación del aire caliente dentro del cuarto de secado de la empresa Pieros Pastas, este proceso se llevará a cabo mediante un software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) donde se tendrán en cuenta el comportamiento de dicho fluido dentro de la cámara de secado, con el fin analizar el comportamiento del aire e identificar las falencias del cuarto, lo cual permitirá rediseñar mediante ductos la distribución del aire dentro este, optimizando así la distribución del aire y mejorando la extracción de humedad en la materia prima.

En el capítulo 1 se encuentra el estado actual referente al trabajo, donde se aprecia la composición de la materia prima que se trabaja en estos cuartos de secado, los cuartos de secado y tipos de secado más comunes que existen y también las herramientas ya sean computacionales o físicas que se utilizaron para la obtención de datos y resultados en este proyecto.

En el capítulo 2 se apreciará todo lo referente a la metodología utilizada para llevar a cabo cada una de las simulaciones, como son las tomas de datos, el modelado simulaciones, resultados y el análisis de cada una de las simulaciones hechas durante el proyecto que permitieron obtener los resultados necesarios para detectar las falencias con las que cuenta el cuarto de secado original al momento de ponerse en funcionamiento y así poder proponer las modificaciones necesarias para la optimización de la distribución del aire en el cuarto de secado, se aprecia los resultados de cada una de las simulaciones.

En el capítulo 3 se encuentra todo lo referente a los resultados, conclusiones y recomendaciones de acuerdo al análisis hecho de las simulaciones, según las falencias, se dará a la empresa una serie de recomendaciones a cerca del cuarto de secado para que éste pueda mejorar su distribución y por ende su producción.

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la empresa Pieros Pastas tiene un horno de secado el cual no ofrece las condiciones óptimas de secado, ya que cuando se trabajaba con éste se presentan pérdidas en la materia prima debido a que el producto no obtiene un secado homogéneo dentro de la cámara de secado, lo anterior mencionado se debe a que el aire caliente suministrado para reducir la humedad de la pasta no se distribuye uniformemente dentro de la cámara, lo que ocasiona que alguna parte de la producción se queme por el exceso de calor, otra obtenga una extracción de humedad óptima y otra quede con más humedad de la requerida. Esto ha ocasionado que para llevar a cabo este proceso de secado se opte por buscar nuevas alternativas artesanales, lo que conlleva a que aumente el tiempo de secado y disminuya la producción.

Es por esta razón que se planteó llevar a cabo este proyecto con el fin de analizar las causas del funcionamiento inadecuado del cuarto de secado de la empresa Pieros Pastas, por medio del análisis visual de los resultados obtenidos computacional, se determinarán las causas del problema para posteriormente proponer un rediseño, el cual permita mejorar la distribución de aire caliente dentro del horno, de tal forma que la extracción de humedad de la pasta sea mejor y se optimice la producción con los cambios sugeridos a la empresa, minimizando así el consumo de energía y contribuyendo con reducir los efectos nocivos sobre el medio ambiente. Logrando la ejecución correcta de este proyecto, se presenta el potencial de la carrera de ingeniería mecánica para resolver problemas en la industria alimentaria.

Para optimizar el cuarto se deberá hacer un rediseño, al momento de hablar de un rediseño, se busca que sea lo menos complejo e invasivo para evitar demoler parte del cuarto, mitigar los costos de inversión de la propuesta para el nuevo sistema, puesto que ya tenemos gran parte del cuarto que cuenta con un buen funcionamiento y lo que se busca es optimizar más no remodelar por completo la instalación.

3. OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo general

Optimizar mediante CFD un cuarto para secado de pasta alimenticia de la empresa Pieros Pasta.

3.1.2 Objetivos específicos

- Simular el cuarto de secado original mediante CFD con el fin de observar el comportamiento dinámico del fluido dentro de la cámara de secado y así determinar las condiciones de operación.
- Identificar las falencias del cuarto de secado mediante el análisis de los resultados de la simulación.
- Plantear alternativas para mejorar el proceso de secado de acuerdo a las falencias detectadas.
- Simular el cuarto de secado con las propuestas mediante CFD.
- Analizar la eficiencia de las propuestas de rediseño del cuarto de secado.
- Presentar a la empresa Pieros Pastas la mejor propuesta para mejorar el funcionamiento del horno.

4. ESTADO ACTUAL

El proceso de secado de la pasta alimenticia consiste en la eliminación del exceso de agua que esta contiene. Para lo cual es de vital importancia prestar atención a una serie de defectos que se pueden presentar durante dicho proceso, como son: la cementación, grietas, decoloración, los cuales deprecian el valor de la pasta como producto al momento de comercializarse. (Acosta 2007)

La pasta alimenticia está constituida de diferentes materias primas, las cuales, al hacer unión de ellas, forman una masa que se podrá moldear fácilmente, dándole las diferentes formas que se conocen hoy en el mercado. (Acosta 2007)

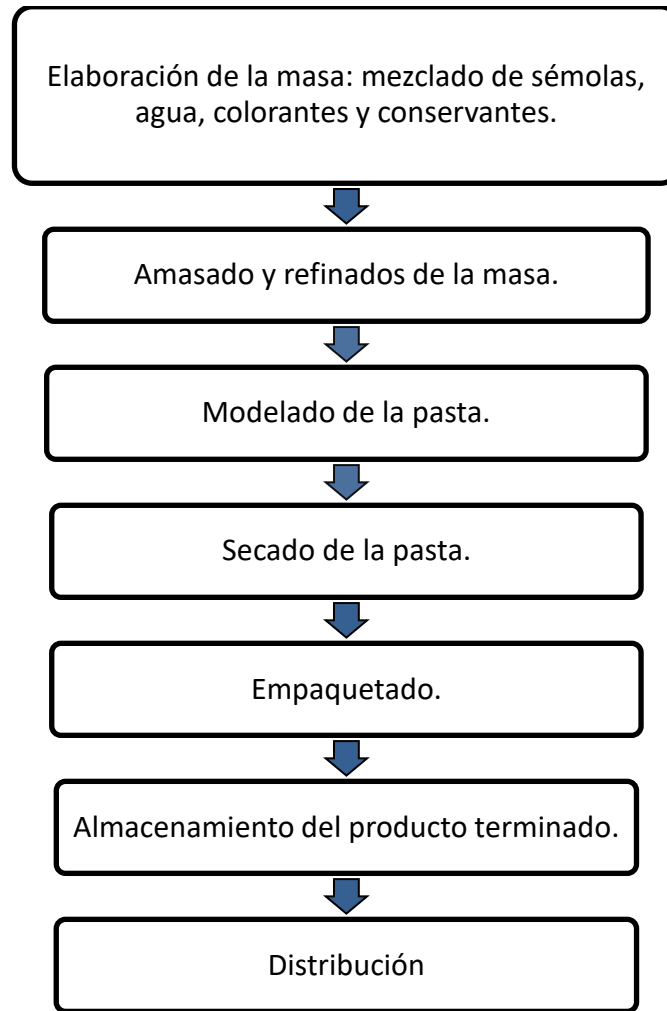
4.1 MATERIA PRIMA PARA ELABORACIÓN DE PASTA

Según el código alimentario (Reglamento Técnico nacional colombiano para la elaboración, circulación y comercio de Pastas alimenticias) se designarán con el nombre de pastas alimenticias los productos obtenidos por desecación de una masa fermentada elaborada con sémolas o harinas procedentes de trigo duro, trigo semiduro, trigo blando o sus mezclas con agua potable. La pasta es un alimento nutritivo que contiene carbohidratos complejos y es baja en grasa. Es un alimento de bajo costo, fácil de preparar, versátil que puede ser consumido por todos los sectores de la población. (Acosta 2007)

Las materias primas indispensables en la fabricación de pastas alimenticias secas son la harina o sémola de trigo duro, o una mezcla de ambas y el agua. Existen también otros ingredientes que ayudan a mejorar su calidad nutricional u organoléptica de las pastas pero que no se les considera como vitales o importantes para el objetivo del presente trabajo. Las pastas son elaboradas preferentemente, a partir de sémola producida durante la molienda de trigos cristalinos, debido a que presentan características culinarias de mejor calidad. Durante la molienda de trigos cristalinos también se produce harina, pero en un valor inferior al de sémola, considerándose como un subproducto. La harina de trigo puede utilizarse para producir pastas, sin embargo, éstas presentarán características de calidad culinaria inferiores respecto a las características que presentan las pastas producidas a partir de sémola, como, por ejemplo, menor resistencia al exceso de cocción (Guncay 2017) ; (Acosta 2007) ; (Mann and Singh 2020).

4.2 PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE PASTA

El proceso de producción de pasta alimenticia está constituido dentro del siguiente proceso: elaboración de la masa, fermentación, forma, secado y empaclado, como se indica en el siguiente diagrama.



4.2.1 Elaboración de la masa

La elaboración de la pasta llamada masa cuenta con diferentes parámetros que determinan la calidad, estos son:

- Agua
- Cenizas
- Tamaño de partícula
- Color
- Humedad

El agua para el proceso de producción de pasta debe ser potable, puesto que de lo contrario no se obtendrá un producto de buena calidad e higiénico que sea apto para el consumo humano. (Escamilla, 2001)

Los ingredientes que comúnmente se adicionan con el fin de enriquecer las propiedades nutritivas o sensoriales del producto son: albúmina de huevo en polvo, huevo entero o clara de huevo (líquido o en polvo), harina de soya, sal yodada, ajo, perejil, apio, tomate, cebolla, espinacas, vitaminas, saborizantes, colorantes naturales o artificiales. (Guncay 2017)

4.2.2 Amasado

El amasado es dar la consistencia de la harina para que esta sea óptima para llevar a cabo el modelo de la pasta que se quiere secar, este proceso puede ser llevado a cabo industrialmente por medio de maquinaria o artesanalmente a mano por personas, el proceso termina cuando se llega a la textura deseada de la materia prima para seguir el tratamiento.

4.2.3 Modelado

El modelado de la masa es según la empresa y el tipo de pasta que la empresa quiera producir, en el caso de la empresa Pieros Pastas, se tratan pastas tipo tallarines. La empresa Pieros Pastas cuenta con una máquina semi manual, puesto que la máquina cuenta con un operario que se encarga de dar el punto de la masa para posteriormente dar la forma deseada y de esta forma llevar la materia prima al secado.

4.2.4 Secado

Se hará una mayor enfatización en esta parte del proceso de elaboración de la pasta alimenticia, puesto que es lo que se quiere optimizar en el cuarto de secado para que se realice de una mejor manera y que no haya pérdida de materia prima para la empresa.

El secado o deshidratación es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia. Hoy en día la industria de alimentos deshidratados constituye un sector muy importante dentro de la industria alimentaria extendido por todo el mundo. El tamaño de las instalaciones varía desde simples secadores solares hasta grandes y

sofisticadas instalaciones de secado. En el mercado puede encontrarse una amplia variedad de productos deshidratados (vegetales, frutas, pescados, cereales y productos lácteos) o formulados a partir de ingredientes deshidratados como es el caso de las salsas y sopas en polvo. (Acosta 2007)

Generalmente se entiende por deshidratación la operación mediante la cual se elimina la totalidad o un porcentaje del agua de la sustancia que la contiene. Esta definición puede ser aplicada a sólidos, líquidos o gases y tal como está expresada puede servir para describir varias operaciones unitarias como la evaporación, la absorción, etc. Sin embargo, su tratamiento teórico y la tecnología empleada las diferencian completamente.

La mayoría de productos agroalimentarios son sólidos por lo que se define mejor la deshidratación como la operación básica por la que el agua que contiene un sólido o una disolución (generalmente concentrada) se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases (Figura 1). (Gil 2013; Sorolla 2016)

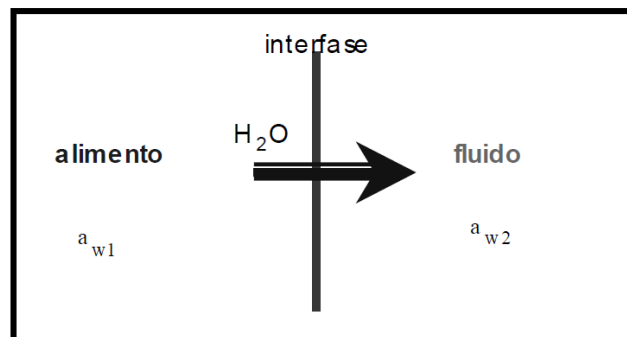


Figura 1: Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación.

En la figura 1 se aprecia el proceso de secado, el cual consiste en extraer la humedad de algunos alimentos sólidos con humedad en exceso, por medio de un cambio de temperatura en el fluido, este cambio se puede dar por medio de la adición de temperatura al fluido o por medio de la convección natural con el ambiente. Esto se realiza con el fin de facilitar su conservación o transporte sin que éste se vaya a deteriorar en corto tiempo.

El secado se separa en tres diferentes etapas: presecado inicial, presecado y secado final. El secado del producto progresa de la superficie hasta el centro. Durante esta operación la superficie no debería secarse con demasiada rapidez con relación al interior de la pasta, ya que se generarían tensiones que podrían dar lugar

a grietas en el producto terminado, es importante secar la pasta muy cuidadosamente, pues si se seca demasiado rápido podría cuartearse, agrietarse o quebrarse y, si se seca demasiado lento podría conducir al desarrollo de hongos, agrietamientos o decoloración en el producto. (Sorolla 2016)

La remoción de humedad conlleva también a una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transporte y almacenamiento de estos productos. La máxima reducción de volumen es la que se consigue al convertir alimentos líquidos en alimentos en polvo, sobre todo si el polvo obtenido se prensa en bloques o tabletas. El extremo contrario lo constituyen los alimentos sólidos liofilizados, en los que la reducción de volumen es prácticamente despreciable o muy pequeña. Entre estos dos extremos se encuentran la mayoría de los alimentos con distintos niveles de encogimiento dependiendo del tipo de producto, del método y de las condiciones de secado. (Figuerola 2014)

Otro de los objetivos que se persiguen con la deshidratación de alimentos es la transformación de éstos en materias primas adecuadas para el mezclado y formulación de nuevos productos, como es el caso de las sopas deshidratadas, frutas y cereales para desayuno, etc. (D. Reay 2002; Gil 2013; Sorolla 2016)

Sin embargo, el secado también puede provocar cambios indeseables en los alimentos. El tamaño y la forma pueden cambiar considerablemente tal y como se ha expuesto anteriormente, de manera que cuando se reconstituye el alimento, este no recupera su forma y tamaño originales. Los cambios de color también pueden darse debido a la exposición durante el secado a altas temperaturas, cambios que perduran después de la reconstitución. Otro aspecto importante es el cambio en la textura debido al encogimiento celular provocado por la pérdida de agua y las altas temperaturas, así como al posible cambio de estado gomoso a vítreo. (Gil 2013; Sorolla 2016)

Tipos de secado.

Existen dos tipos de secado, por convección natural y por convección forzada. El secado por convección natural solo depende de las condiciones naturales del ambiente donde se encuentra, mientras que el secado por convección forzada necesita de fuerzas externas que faciliten el movimiento del aire dentro del cuarto de secado para tener una distribución dentro de éste, el proceso por convección forzada en ocasiones es mucho más práctico y eficiente que el natural. (Vázquez et al. 2006)

Los valores que se pueden apreciar en la Tabla 1, son valores sugeridos para llevar a cabo el proceso de secado de la materia prima cuando ésta ya se encuentra lista para la extracción de humedad, pero este puede variar dependiendo del cuarto de secado con el que se cuente, el tamaño del cuarto, el poder calorífico, la velocidad del fluido, la cantidad de materia prima que se requiera secar, la humedad del ambiente y presión que ésta tenga. (Sorolla 2016)



Figura 2: Hornos de convección forzada.

En la figura dos se puede apreciar dos clases diferentes de hornos de secado, el cuarto **(b)** es un horno convencional, más utilizado antiguamente en el proceso de secado para materiales de construcción y el cuarto **(a)** es un cuarto industrial, mas moderno y automatizado.

El proceso de secado se define como la extracción de la humedad de un producto al cual se quiere preservar o transportar según su necesidad. (Sorolla 2016)

Remoción de humedad

El proceso de secado consiste remoción de humedad de una sustancia, involucrando los fenómenos de transferencia de calor y masa, en forma simultánea. La transferencia de calor ocurre cuando el sólido pierde humedad, y la transferencia de calor se verifica cuando el medio ambiente (aire) entrega calor al sólido. Una de las formas usuales de secado consiste en hacer circular una corriente de aire caliente por sobre el material a secar. El nivel de agua deseado lo determina el tipo de producto final que se busca, por ejemplo, en el caso de secado de granos y cereales se realiza hasta obtener alrededor de 12% de agua en el producto. En el

caso de frutas secas los niveles son más bajos (8-10%), en el caso de nueces y semillas los niveles son todavía más bajos (3-5%). (D. Reay 2002)

Para las pastas se tendrá un nivel de humedad alrededor del 12% como en el caso de los granos y cereales, puesto que éstas son preparadas a base de cereales y al no manejar este porcentaje, el producto puede sufrir daños en su composición. (Acosta 2007)

En la Tabla 1 se pueden observar el tiempo y la temperatura de secado de las dos clases de pastas que existen en la industria que son las pastas cortas y las pastas largas. Cada una de ellas se pueden separar por su forma, pero las pastas se clasifican solo de tipo largo y de tipo corto. También se puede apreciar los diferentes tipos de secado que se conocen en la industria de la deshidratación de pastas alimenticias. Aunque los dos principales tipos de pastas conservan el mismo rango de temperatura de secado, el tiempo varía según la técnica utilizada para el secado.

Tabla 1: Temperatura y tiempo de secado para pastas.

	PASTAS CORTAS		PASTAS LARGAS	
PROCESOS	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
CTD	8	55	16	55
HTD	4.5	55-75	10	55-75
VHTD	2.5	74-100	5.5	74-100

Fuente 1: Lorenz, 1991

CTD: Temperatura Convencional de Secado.

HTD: Temperatura Alta de Secado.

VHTD: Temperatura Muy Alta de Secado.

Al momento de poner en funcionamiento un cuarto de secado de pastas, la materia prima es sometida a un fenómeno llamado transferencia de calor. Esto se debe a que va a existir un gradiente de temperatura y humedad, debido a que el ambiente estará energizado y éste le entregará calor a la materia prima, provocando así la remoción del exceso de humedad con el que cuenta la masa. Dicho proceso de extracción de humedad debe ser muy cuidadoso, puesto que, si se no se respetan los tiempos y las temperaturas, la materia prima va a sufrir cambios drásticos provocando así mal formaciones, agrietamientos, hongos, etc, que puede dañar el producto final. (Vinet and Zhedanov 2011)

Otro tema importante para el secado de pastas es la distribución uniforme del aire dentro del cuarto de secado, puesto que, si no existe una distribución uniforme, el

secado de la materia prima tampoco lo será, provocando así una pérdida tanto de materia prima como de consumo de energía.

Gradiente de humedad.

Tan pronto se inicia el secado, ya sea natural o de manera forzada, la distribución del contenido de humedad en el interior de la pieza se modifica. En forma simple, puede explicarse el secado de la materia prima como el resultado del movimiento de la humedad desde el interior hasta la superficie, donde se evapora y escapa a la atmósfera circundante.

Según (Hoheisel 1989), la diferencia que se presenta entre el contenido de humedad de la materia prima en el centro (H_{Centro}) y en la superficie ($H_{\text{Superficie}}$), denominada gradiente de humedad, da origen a la circulación interna del agua del centro a la periferia y es la causa del secado. Mientras más elevado sea el gradiente de humedad, más rápido secará la materia prima.

Cuando se llega al estado en el que $H_{\text{Centro}} = H_{\text{Superficie}} = H$ dentro de la cámara de secado, teóricamente se termina el movimiento de humedad en la pasta y esta no se seca más por falta de un gradiente de humedad.

4.2.5 Empaquetado

Posterior al secado, la materia prima es llevada a la zona de empaquetado donde se llenarán las bolsas de acuerdo a la capacidad de cada una de ellas. Dicha acción puede ser llevado a cabo de manera manual como también con ayuda de una maquina empacadora. Esta acción se realiza con el fin de preparar el producto para el transporte, exhibición o consumo del mismo.

4.2.6 Almacenamiento del producto terminado.

El almacenamiento del producto es un papel importante dentro de la cadena del suministro del negocio, esta acción es importante para saber con qué cantidad de producto se cuenta para cumplir con la demanda del producto, también es importante para controlar el proceso logístico, desde el cuidado adecuado de los productos, hasta la organización de su traslado de los puntos de venta.

4.2.7 Distribución

La distribución del producto es la última parte de la cual se encarga la empresa, se realiza la distribución del producto final ya empaquetado, es llevado a las diferentes

tiendas o empresas las cuales han solicitado el producto para comercializarlo en sus establecimientos.

4.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE LOS FENÓMENOS FÍSICOS.

Ecuación general de la energía

El aire circula por un conducto gracias a que existe una diferencia de presión entre sus extremos. Esta diferencia de presión es una forma de energía que se explica a través de la ecuación general de la energía.

La energía total por unidad de tiempo de una corriente fluida en un sistema abierto se establece como la suma de su energía interna, su flujo de trabajo, su energía potencial y su energía cinética, por el flujo másico circulante:

$$\dot{E} = \dot{m} \left[u + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right] \quad (1)$$

Donde:

$\dot{E}$	Energía de la corriente por unidad de tiempo (W)
$\dot{m}$	Flujo másico de la corriente (kg/s)
u	Energía interna del fluido (J/kg)
P	Presión de la corriente (Pa)
ρ	Densidad del fluido (kg/m ³)
V	Velocidad de la corriente (m/s)
g	Aceleración de la gravedad (m/s ²)
z	Elevación (m)

Para diferencias de elevación de hasta 100 m, velocidades inferiores a 50 m/s (flujo incompresible) y régimen estacionario, las presiones obedecen al teorema de Bernoulli (ecuación 2), el cual es una forma especial de la ecuación 1, donde se asume que no varía la energía interna del fluido, al no variar apreciablemente su temperatura ni su fase.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = cte \quad (2)$$

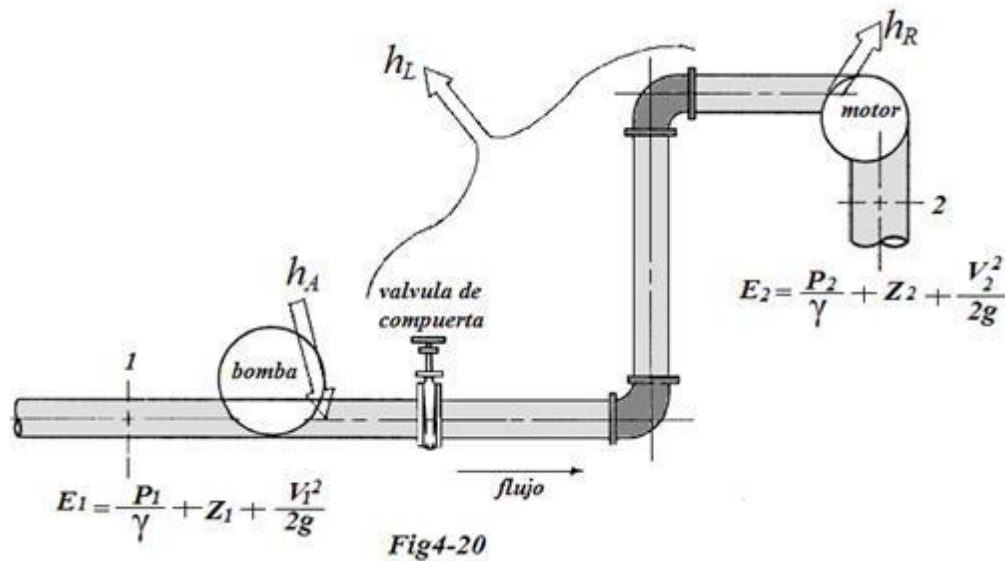


Figura 3: Caudal, presiones y velocidad. (Aranda 2017).

En la figura 3 se puede apreciar un sistema donde se deben aplicar las ecuaciones mencionadas para su solución, dependiendo lo que se deba hallar y las condiciones que se tengan.

4.3.1.1 Presión estática, dinámica y total

La presión estática es la fuerza por unidad de superficie ejercida por el fluido sobre las paredes del conducto, se representa por P_e y se mide en Pascales (Pa) o en mm.c.d.a (milímetros de columnas de agua).

La presión dinámica se refleja en la ecuación 3, es llamada como P_d . La presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido, se define como:

$$P_d = \frac{V^2 \rho}{2} \quad (3)$$

La presión total de un sistema se denomina a la suma de la presión estática y dinámica como se aprecia en la ecuación 4.

$$P_t = P_d + P_e \quad (4)$$

4.3.1.2 Pérdida de carga.

Se define como pérdida de carga o de presión, a la suma de pérdidas mayores y menores que puede llegar a tener un sistemas, ya sea por accesorios o reducciones de áreas que éste lleve en su diseño. Este trayecto es con frecuencia el más largo.

Para calcular la pérdida total de presión en el sistema, se suman las pérdidas para cada sección de tubo recto y cada conexión en el trayecto que se haya elegido. Se deben incluir las pérdidas de presión a través de cualquier equipo. (Aranda 2017; Mazariegos 2007)

Se deben calcular las pérdidas de presión en sistemas de conductos para determinar la capacidad de los ventiladores, verificar el funcionamiento del sistema y balancear las cantidades de aire. La presión del aire necesaria para vencer la fricción en un conducto es la que determina el gasto de energía del ventilador. (Aranda 2017; Mazariegos 2007)

La pérdida de presión conductos se puede calcular por la fórmula de Darcy que contempla la longitud de la conducción, el diámetro hidráulico, la velocidad y densidad del aire y el coeficiente de fricción que, éste, a su vez, depende del número de Reynolds, de rugosidad de las paredes, de las dimensiones y la disposición del mismo. Sin embargo, la forma práctica de hacerlo es recurriendo a tablas obtenidas de experimentos y normalizadas a base de todo el equipo técnico y son válidos para conducciones con la rugosidad corriente en materiales normalmente usados. (Aranda 2017; Mazariegos 2007)

Cabeza de pérdida:

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (5)$$

Pérdida de presión:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v_{prom}^2}{2} \quad (6)$$

Donde:

- h_f Pérdida de energía (m).
- f Factor de fricción de Darcy (adimensional).
- L Longitud de tubería (m).
- D Diámetro hidráulico (m).
- u^2 Velocidad media de fluido (m/s).
- g Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

Ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

Donde:

f Factor de fricción de Darcy (adimensional).

ε Rugosidad (m).

D_h Diámetro hidráulico (m).

Re Número de Reynolds (adimensional).

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\mu D_h}{\nu} \quad (8)$$

Donde:

μ Velocidad en el ducto (m/s).

D_h Diámetro hidráulico (m).

ν Viscosidad cinemática (m²/s)

Diámetro hidráulico para ductos:

El termino diámetro hidráulico es utilizado para estudiar el comportamiento de los fluidos en tuberías que no son circulares, y se puede hallar en diferentes secciones de tuberías como, por ejemplo:

Ducto rectangular:

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (9)$$

Donde:

ab Área perpendicular a la dirección del fluido (m²).

a Alto del ducto (m).

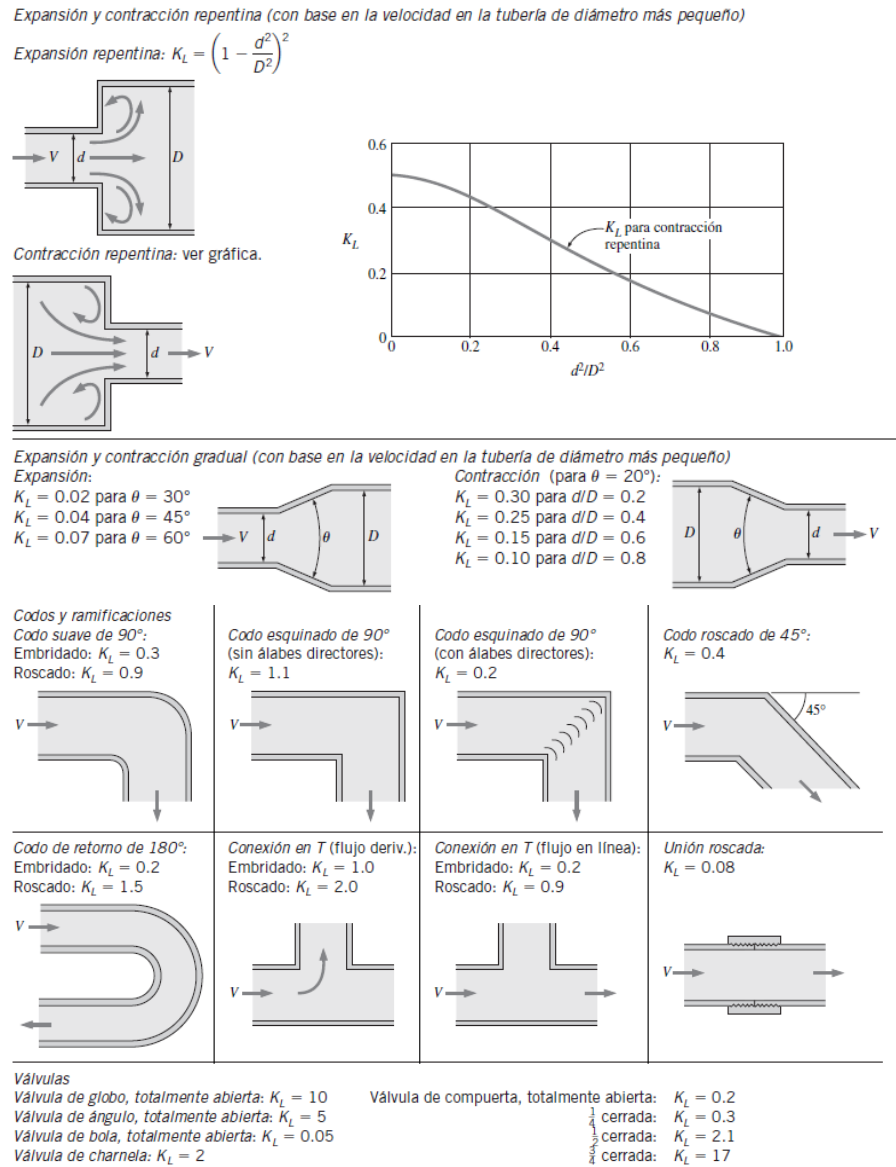
b Ancho del ducto (m).

Ducto cuadrado:

$$D_h = \frac{4a^2}{4a} \quad (10)$$

- a^2 Área perpendicular a la dirección del fluido (m^2).
 a Alto del ducto (m).

Pérdidas menores.



* Ésos son valores representativos para coeficientes de pérdida. Los valores reales dependen principalmente del diseño y la fabricación de los accesorios y pueden diferir considerablemente de los valores dados (en especial para las válvulas). En el diseño final se deben usar los datos reales del fabricante.

Figura 4: Coeficiente de K_L para accesorios (Çengel and Cimbala 2006).

Hallando el coeficiente de K_L para accesorios con la ayuda de la Figura 4, se puede hallar las pérdidas menores por medio de la siguiente ecuación.

$$h_L = \frac{K_L V^2}{2g} \quad (11)$$

Donde:

- h_L Perdida menor por accesorio (m).
- K_L Coeficiente por accesorio (adimensional).
- V Velocidad promedio (m/s).
- g Gravedad (m/s²).

4.3.2 Convección y Psicrometría.

La convección y la psicrometría son parte fundamental en el proceso del secado de materiales o alimentos, se refiere a la pérdida de humedad con el ambiente. La convección se puede dar por medio de la ecuación (11): (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

$$q_{conv} = h \cdot S \cdot (T_{\infty} - T_p) \quad (11)$$

Donde:

- T_{∞} Temperatura del ambiente (K).
- T_p Temperatura de un cuerpo (K).
- h Coeficiente de intercambio de calor (W/m² ·K).
- S Superficie de contacto (m²).
- q_{conv} Intercambio de calor por convección (W).

Las variables incluidas en la ecuación anterior se derivaron explotando un enfoque de dinámica de fluidos, usando el método de Hilbert fórmula para calcular el número de Nusselt y el externo coeficiente de intercambio de calor. (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

Teniendo en cuenta también, la psicrometría es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el ser humano.

Las tablas psicrométricas ofrecen una gran precisión, ya que sus valores son de hasta cuatro decimales; sin embargo, en la mayoría de los casos, no se requiere tanta precisión; y con el uso de la carta psicrométrica, se puede ahorrar mucho tiempo y cálculos. Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se

utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire. (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

Las propiedades psicrométricas del aire han sido recopiladas a través de incontables experimentos de laboratorio y de cálculos matemáticos, y son la base para lo que conocemos como la Carta Psicrométrica. Aunque las tablas psicrométricas son más precisas, el uso de la carta psicrométrica puede ahorrarnos mucho tiempo y cálculos, en la mayoría de los casos donde no se requiere una extremada precisión. (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

Como se mencionó al inicio de este párrafo, la carta psicrométrica es una gráfica que es trazada con los valores de las tablas psicrométricas; por lo tanto, la carta psicrométrica puede basarse en datos obtenidos a la presión atmosférica normal al nivel del mar, o puede estar basada en presiones menores que la atmosférica, o sea, para sitios a mayores alturas sobre el nivel del mar.

Existen muchos tipos de cartas psicrométricas, cada una con sus propias ventajas. Algunas se hacen para el rango de bajas temperaturas, algunas para el rango de media temperatura y otras para el rango de alta temperatura. A algunas de las cartas psicrométricas se les amplía su longitud y se recorta su altura; mientras que otras son más altas que anchas y otras tienen forma de triángulo. Todas tienen básicamente la misma función; y la carta a usar, deberá seleccionarse para el rango de temperaturas y el tipo de aplicación. (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

En una carta psicrométrica se encuentran todas las propiedades del aire, de las cuales las de mayor importancia son las siguientes:

- Temperatura de bulbo seco (Tbs).
- Temperatura de bulbo húmedo (Tbh).
- Temperatura de punto de rocío (Tr).
- Humedad relativa (HR).
- Humedad absoluta (HA).
- Entalpía (h).
- Volumen específico.

En este diagrama se representa la humedad absoluta en ordenadas frente a su temperatura en abscisas, está limitado por la curva de humedad relativa del 100% o curva de saturación, la cual da la humedad del aire saturado en función de su temperatura. El cálculo de los distintos puntos de esta curva se realiza determinando

las humedades absolutas para distintas temperaturas (Figura 5). (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

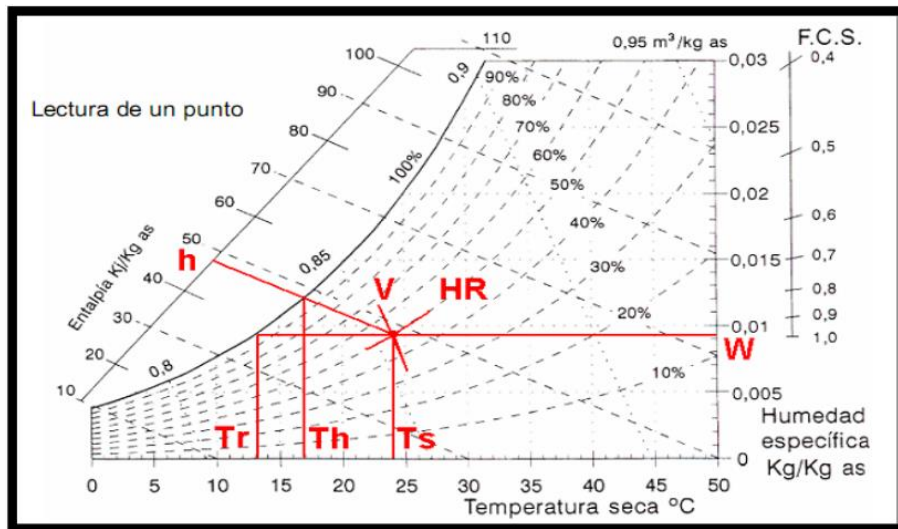


Figura 5: Tabla de psicrometría para valores de temperatura y humedad.

Donde:

Tr: indica temperatura d rocío
V Volumen húmedo
W Humedad específica
HR Humedad relativa
H Entalpia

Descripción de propiedades:

a) Temperatura de Bulbo Seco.

En primer término, tenemos la temperatura de bulbo seco. Como ya sabemos, es la temperatura medida con un termómetro ordinario. Esta escala es la horizontal (abscisa), en la parte baja de la carta, según se muestra en la figura mostrada a continuación:

Las líneas que se extienden verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, se llaman líneas de temperatura de bulbo seco constantes, o simplemente "líneas de bulbo seco". Son constantes porque cualquier punto a lo largo de una de estas líneas, corresponde a la misma temperatura de bulbo seco indicada en la escala de la parte baja. Por ejemplo, en la línea de 40° C, cualquier punto a lo largo de la misma, corresponde a la temperatura de bulbo seco de 40° C (Figura 6). (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

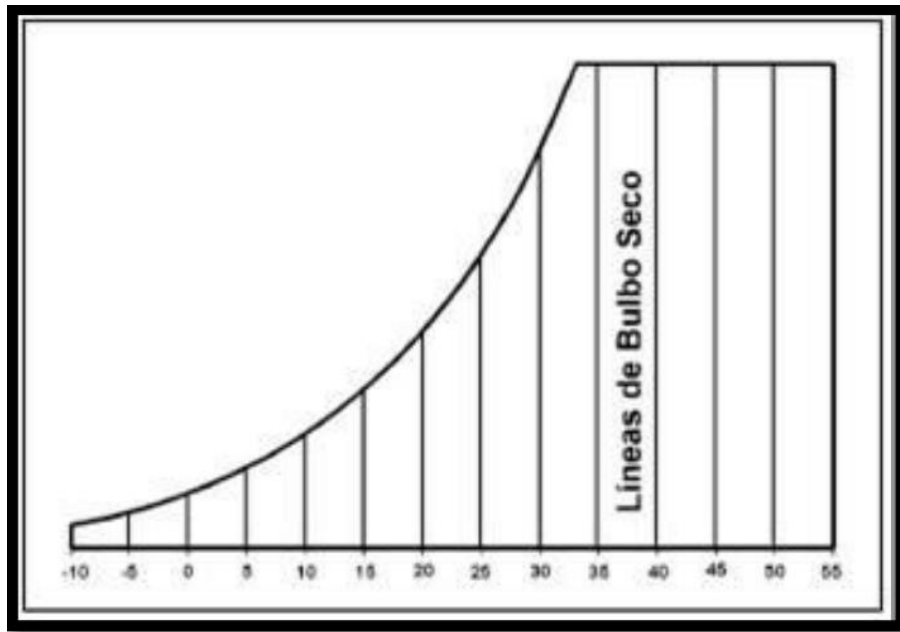


Figura 6: Líneas de temperatura de bulbo seco °C.

b) Temperatura de Bulbo Húmedo.

Es la segunda propiedad del aire de nuestra carta psicrométrica. Corresponde a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo. Como ya se explicó en la sección anterior, es la temperatura que resulta cuando se evapora el agua de la mecha, que cubre el bulbo de un termómetro ordinario (Figura 7). (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

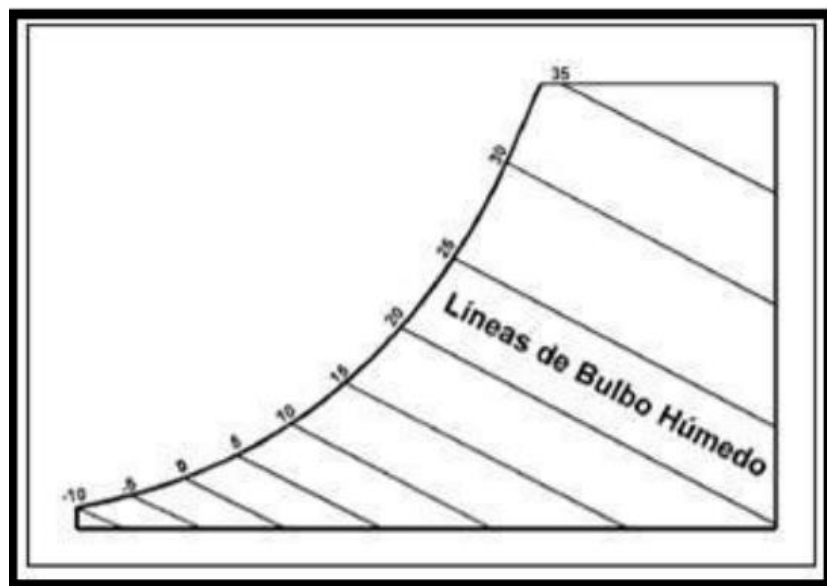


Figura 7: Líneas de temperatura de bulbo húmedo °C.

c) Temperatura de Punto de Rocío

Es otra propiedad de aire incluida en una carta psicrométrica. Esta es la temperatura a la cual se condensará la humedad sobre una superficie. La escala para las temperaturas de punto de rocío es idéntica que la escala para las temperaturas de bulbo húmedo; es decir, es la misma escala para ambas propiedades. Sin embargo, las líneas de la temperatura de punto de rocío, corren horizontalmente de izquierda a derecha, no en forma diagonal como las de bulbo húmedo.

Cualquier punto sobre una línea de punto de rocío constante, corresponde a la temperatura de punto de rocío sobre la escala, en la línea curva de la carta (Figura 8). (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

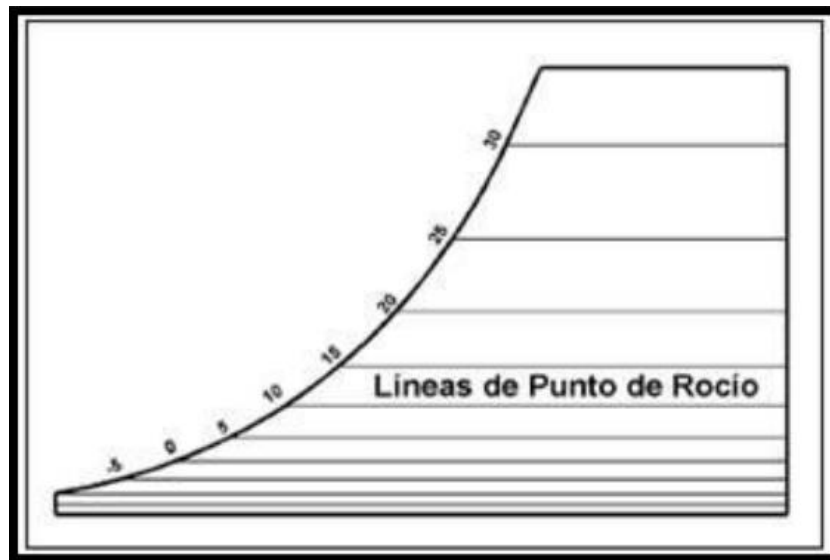


Figura 8: Líneas de temperatura de punto de rocío °C.

d) Humedad Relativa

En una carta psicrométrica completa, las líneas de humedad relativa constante, son las líneas curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Se expresan siempre en porcentaje, y este valor se indica sobre cada línea.

Como ya hicimos notar previamente, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío, comparten la misma escala en la línea curva a la izquierda de la carta. Puesto que la única condición donde la temperatura de bulbo húmedo y el punto de rocío, son la misma, es en condiciones de saturación; esta línea curva exterior, representa una condición de saturación o del 100% de humedad relativa. Por lo tanto, la línea de 100% de Hr, es la misma que la escala de temperaturas de bulbo húmedo y de punto de rocío.

Las líneas de Hr constante, disminuyen en valor al alejarse de la línea de saturación hacia abajo y hacia la derecha (Figura 9). (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

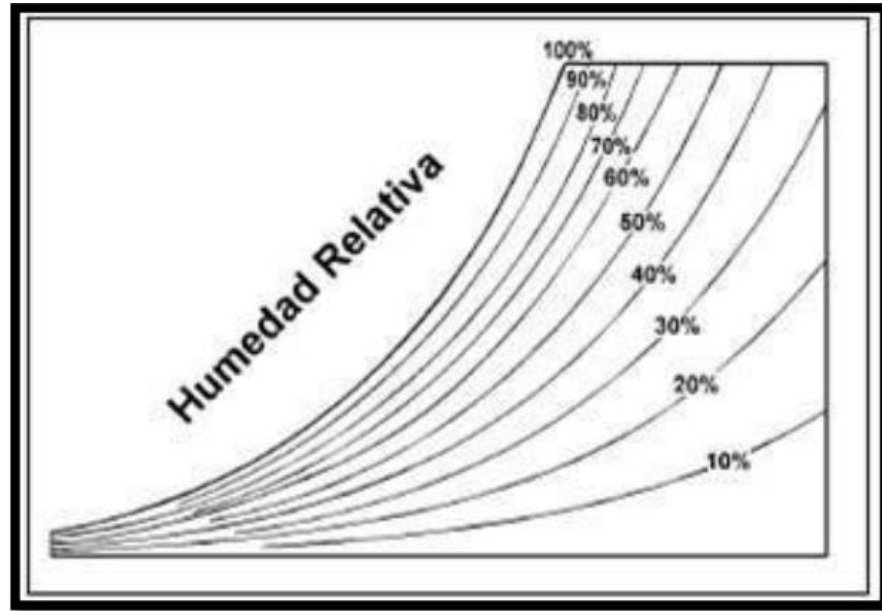


Figura 9: Líneas de humedad relativa %.

e) Humedad Absoluta

La humedad absoluta, es el peso real de vapor de agua en el aire. También se le conoce como humedad específica. La escala de la humedad absoluta, es la escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicrométrica.

Los valores de esta propiedad se expresan, como ya sabemos, en gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg), en el sistema internacional, y en granos por libra (gr/lb), en el sistema inglés.

Las líneas de humedad absoluta, corren horizontalmente de derecha a izquierda, y son paralelas a las líneas de punto de rocío y coinciden con éstas. Así pues, podemos ver que la cantidad de humedad en el aire, depende del punto de rocío del aire (Figura 10). (Çengel and Cimbala 2006; Figueroa 2014; Mendoza 2017)

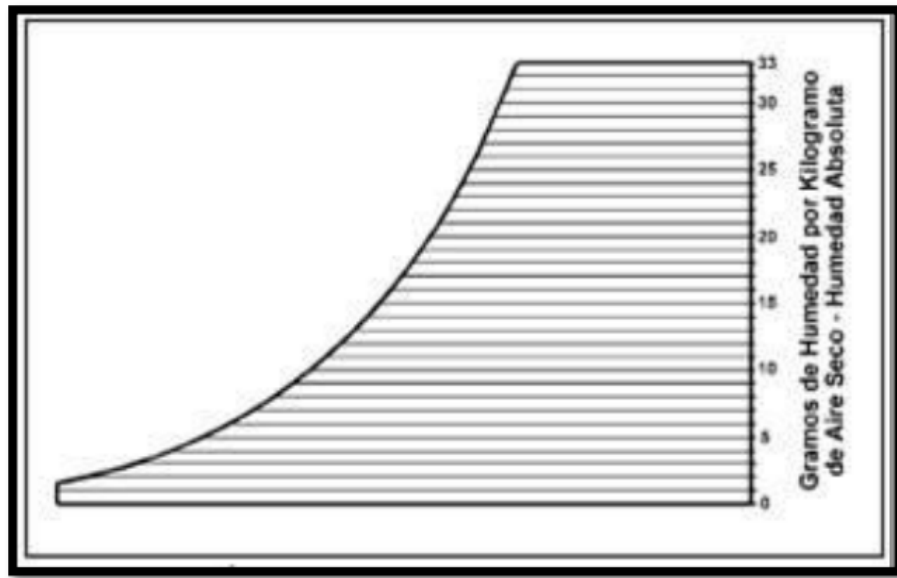


Figura 10: líneas de humedad absoluta en gramos.

f) Calor húmedo

Es la cantidad de calor, expresada en J o KJ requerido, para elevar la temperatura de un Kg de Aire Seco más el vapor de agua presente en un 1K o 1°C.

g) Volumen húmedo

Es el volumen total de aire en metros cúbicos de 1 Kg de aire seco más el vapor que lo contiene a 1 atmosfera.

h) Entalpia total de una mezcla de aire y vapor de agua

Es la entalpia total de 1 Kg de aire más su vapor de agua.

Cabe resaltar que para este proyecto la parte térmica no se tendrá en cuenta, puesto que el objetivo es mejorar la distribución dinámica del fluido dentro del cuarto de secado. Dejando así la posibilidad de que se estudie la parte térmica del cuarto de secado en un proyecto futuro.

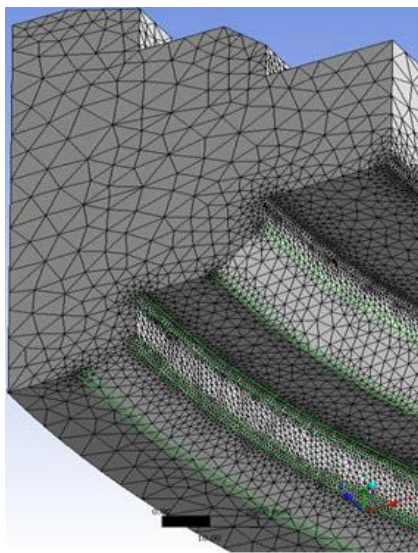
4.4 PROCESO DE SIMULACIÓN.

Para el proceso de simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), se utilizaron los softwares SolidWorks y ANSYS, los cuales permiten diseñar y simular de una manera más sencilla y con más precisión en un menor tiempo gracias a la diversidad de herramientas que estos softwares ofrecen, al igual que por el estudio de elementos finitos permite realizar estudios de fluidos y solidos sobre el movimiento o esfuerzos a los que estos son sometidos, creando así entonces una

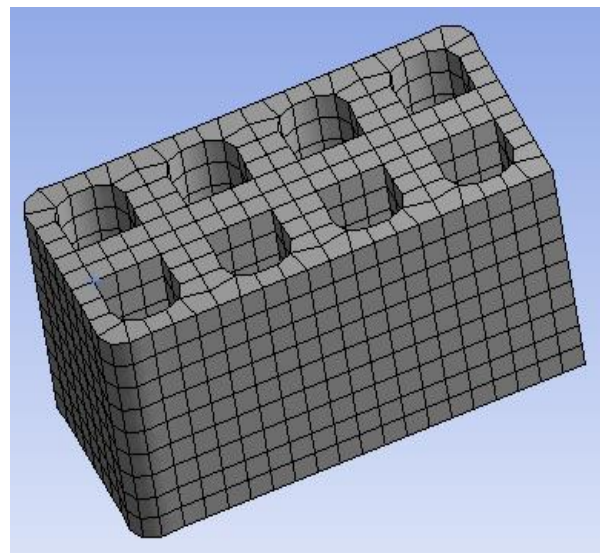
explicación comprensible de cómo el sistema actúa como un todo. Los resultados obtenidos pueden presentarse de manera tabular, gráfica o animada. Este tipo de análisis se utiliza primordialmente para el diseño y optimización, así como para el estudio e investigación de sistemas cuyo nivel de complejidad es tal que su solución manual es prácticamente imposible. (Fernando Ortiz Garces 1994), (Watson L. Vargas 2005)

4.4.1 Tipos de malla

Existen 3 tipos de mallas principalmente en los softwares de simulación, ellas son: las mallas estructuradas, las no estructuradas e híbridas. El uso de estas depende de la complejidad de la geometría si es una geometría regular como por ejemplo un rectángulo se recomienda usar una malla estructurada, pero si la geometría es muy compleja como en el caso de un álabe se recomienda una malla no estructurada. (Pulido 2019)



(a)



(b)

Figura 11: Tipos de malla.

En la figura 11 se parecían dos tipos de malla, en la figura **(a)** se observa una malla no estructurada, esto se debe a la complejidad del diseño que se va a simular, entonces debido a eso se deben realizar una serie de refinamientos en el mallado para mejor precisión. En la figura **(b)** se observa una malla estructurada, dicha malla es utilizada para diseños que no son muy complejos y no requieren tanto refinamiento de esta porque va a tener una precisión similar a la malla refinada. Al momento de escoger la malla, también se debe tener en cuenta un estudio de

convergencia de malla para poder definir el tamaño de la malla para determinados diseños, esto último se tendrá en cuenta para este proyecto.

4.4.2 Modelos de turbulencia.

El software de dinámica de fluidos computacional Fluent, de ANSYS, ofrece las diferentes alternativas de análisis respecto a modelos de turbulencia, los modelos que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Modelos de turbulencia del módulo Workbench de ANSYS)(Brasil Maia et al. 2012).

Modelo	Ecuaciones adicionales	Características
Zero Equation Model	0	Métodos totalmente algebraicos. Flujos libres: chorros, capas de mezclas y flujos externos sobre cilindros.
Spalart-allmaras	1	Aplicaciones aeroespaciales con flujos compresibles a altas velocidades
k- ε Standard	2	Robusto, uso general
k- ε RNG	2	Flujos rápidamente deformados turbulentos.
k- ε Realizable	2	Chorros planos cilíndricos, capas límites de fuertes incrementos de presión adversos, flujo con separación y recirculación
k- ω Standard	2	Bajos números de Reynolds, contornos de pared capa límite y flujos estacionarios.
k- ω SST	2	Incremento de presiones adversos en perfiles aerodinámicos y ondas de choque transitorio.
Tensiones de Reynolds	7	Flujos tridimensionales complejos con elevada turbulencia y rotación. Requiere elevada potencia de cálculo y capacidad de memoria.

Fuente 2 : (Sanz Hernán 2018)

El modelo de viscosidad que se utilizó es k- ω Standard debido a que es el modelo de viscosidad que más ha sido utilizado por diferentes autores en diversos estudios

que se asemeja a lo que se llevará a cabo en la simulación de este proyecto. (Gao et al. 2018; Lu and Lu 2016; Mann and Singh 2020; Mi 2020)

El modelo k- ω Standard es un modelo de dos ecuaciones, lo que significa que se deben resolver dos ecuaciones de transporte adicionales: una para la energía cinética turbulenta k y otra para la disipación específica ω , dadas, respectivamente, por: (Brasil Maia et al. 2012)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \vec{\nabla} k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \mathbf{U} \omega) = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \vec{\nabla} \omega \right] + (1 - F_2) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \vec{\nabla} k \vec{\nabla} \omega + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 \quad (13)$$

Las constantes utilizadas en las ecuaciones del modelo de SST se definen como:

$$\beta' = 0,09; \alpha_1 = 5/9; \beta_1 = 0,075; \sigma_{k1} = 2; \sigma_{\omega 1} = 2 \\ \alpha = 0,44; \beta_2 = 0,0828; \sigma_{k2} = 1; \text{ y } \sigma_{\omega 2} = 1/0,856.$$

Los coeficientes del modelo SST son una combinación lineal de los coeficientes correspondientes de los modelos subyacentes, dados por: (Brasil Maia et al. 2012)

$$\phi_3 = F_2 \phi_1 + (1 - F_2) \phi_2 \quad (14)$$

En las ecuaciones de transporte. P es el tensor de producción de turbulencia debido a fuerzas viscosas, que se calcula mediante: (Brasil Maia et al. 2012)

$$P_k = \mu_t \vec{\nabla} \mathbf{U} \cdot (\vec{\nabla} \mathbf{U} + \vec{\nabla} \mathbf{U}^T) - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \mathbf{U}) (3\mu_t \vec{\nabla} \cdot \mathbf{U} + \rho_k) \quad (15)$$

5. METODOLOGÍA

5.1 FUNCIONAMIENTO ACTUAL DEL PROCESO DE SECADO

La empresa Pieros Pastas cuenta con un horno para sedado de pasta, este horno actualmente cuenta con algunas falencias las cuales no le permite realizar un secado óptimo a la materia prima generando pérdidas para la empresa tanto en los insumos como en la comercialización también.

En la actualidad la empresa decidió realizar el proceso de secado por convección natural, es decir hacer circular aire solo sin ninguna adición de energía, debido a la mala distribución con la que cuenta el horno, al adicionar calor en este entorno, lo que provocará es que una parte de la materia prima se queme, es decir que se le extraiga demasiada humedad y al mismo tiempo otra parte no alcance a tener la extracción de humedad optima que se necesita para tener un producto de excelente calidad.

Para conocer más a fondo las falencias del cuarto de secado se decidió visitar el cuarto de secado y tomar una serie de datos entre los cuales están las dimensiones de las cámaras de secado, temperatura ambiente y velocidades en los ductos. Una vez dentro del entorno a trabajar, se procedió con la respectiva toma de datos con la ayuda de un tubo de Pitot. Para este proceso se debió encender el ventilador del cuarto de secado y de esta manera tomar los datos de velocidad necesarios para llevar a cabo las simulaciones respectivas.

La temperatura ambiente del lugar en el momento fue de 22.5 °C, a partir de este dato, el tubo de Pitot arrojó los siguientes datos:

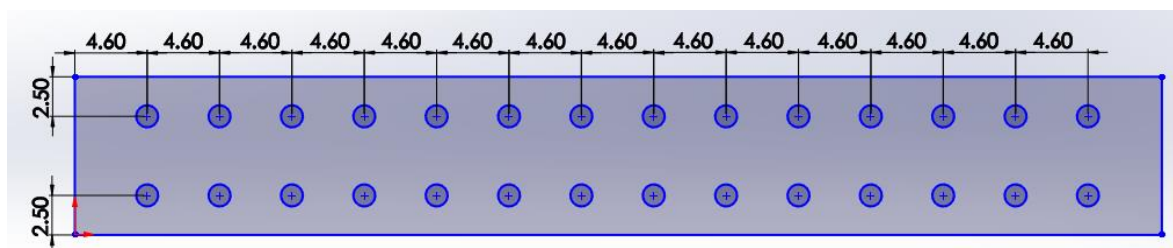


Figura 12: Cara, salida ducto principal de velocidad.

En la Figura 12 se puede observar la cara del ducto principal por donde sale el aire a una determinada velocidad, hace referencia a las diferentes tomas de datos que se realizaron con el tubo de Pitot, se realizaron 28 mediciones en puntos estratégicos de esta cara a unas determinadas distancias como se puede observar, las distancias se escogieron teniendo en cuenta las dimensiones del ducto de salida de forma que los puntos se distribuyeran simétricamente.

En la Tabla 3 se pueden apreciar los datos obtenidos por el tubo de Pitot, cabe resaltar que el tubo de Pitot mide presiones, y para hallar velocidades es necesario utilizar la ecuación 16.

Tabla 3: Datos tubo de Pitot

Punto	Presión (Pa)	Velocidad (m/s)	Punto	Presión (Pa)	Velocidad (m/s)
1	5	2.89	15	14	4.84
2	5	2.89	16	16	5.18
3	5	2.89	17	16	5.18
4	6	3.17	18	17	5.34
5	5	2.89	19	23	6.21
6	5	2.89	20	21	5.93
7	5	2.89	21	26	6.6
8	5	2.89	22	26	6.6
9	5	2.89	23	27	6.73
10	5	2.89	24	27	6.73
11	6	3.17	25	26	6.6
12	6	3.17	26	26	6.6
13	8	3.66	27	26	6.6
14	9	3.88	28	23	6.21

Teniendo en cuenta los datos que se obtuvieron por el tubo de Pitot se evidencia que la presión en la entrada al cuarto no es uniforme y esta falencia podría ser una de las causas del deficiente proceso de secado, por ende, se opta por utilizar la Ecuación (16) para que de esta forma obtener las diferentes velocidades en cada uno de los puntos tomados, los cuales se pueden ver en la Tabla 3.

Ecuación guía del tubo de Pitot para hallar velocidad con cada medición tomada:

$$V = \sqrt{\frac{2Pd}{\rho}} \quad (16)$$

Teniendo en cuenta los datos que se obtuvieron a partir de la Ecuación (16), se determina una velocidad promedio de 5 m/s y una presión promedio de 14 Pa.

5.1.1 Características del cuarto.

El cuarto de la empresa Pieros Pasta se encuentra construido mediante paneles de acero inoxidable los cuales en su interior tiene fibra de vidrio como material aislante.

En la figura 13 se aprecia la vista frontal del diseño del cuarto de secado, el cual está dividido en dos cámaras de secado iguales (medidas en cm).

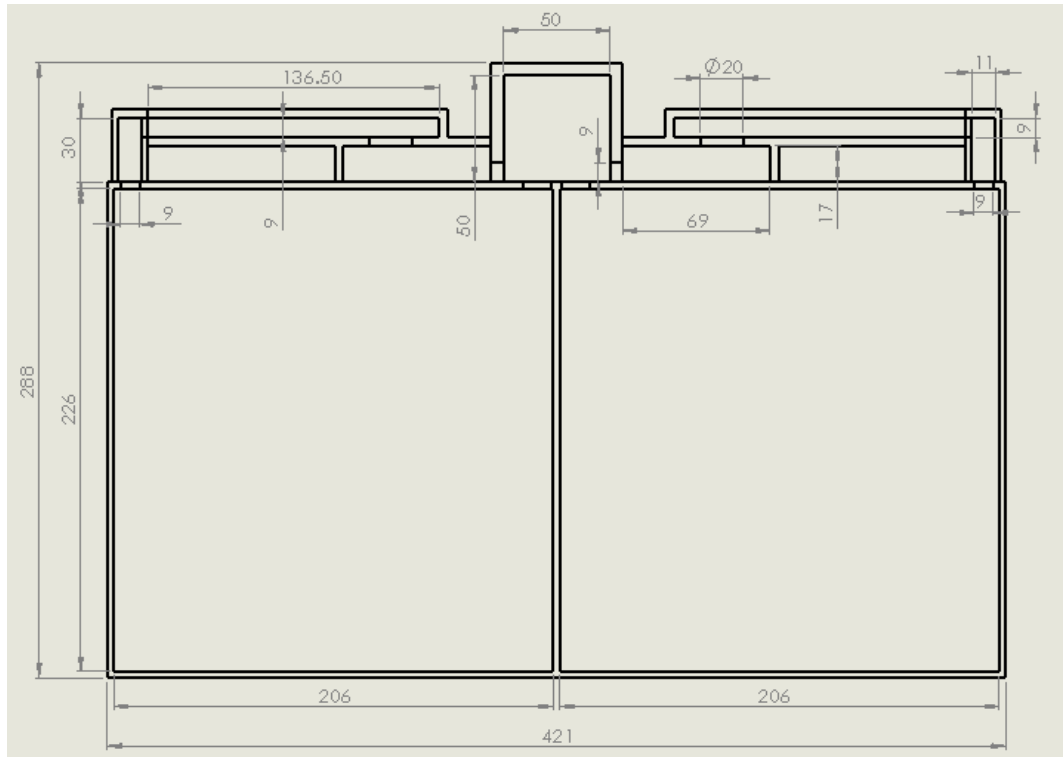


Figura 13: Medidas del cuarto de secado real (Dimensiones en cm).

Para el proceso de secado de la pasta, en estos cuartos se introducen unos carros sobre los cuales se coloca el producto a ser tratado (Figura 14), posteriormente el producto será empaquetado para así llevar a cabo su comercialización en el mercado.



Figura 14: Cuarto de secado.

Motor marca VOGUES.

Para lograr el movimiento del fluido dentro de las cámaras de secado, se utiliza un motor con las siguientes especificaciones:

Tabla 4: Especificaciones del motor.

Modelo	B 80 A4/EC
Peso [kg]	14.55
Eficiencia [%]	78.0
Velocidad [rpm]	1730
Potencia [hp]	1
Voltios	220
Potencia [kW]	0.75
Frecuencia [hz]	60

Fuente 3. Ficha técnica CAXIAS DO SUL - RS - IND. BRASILEÑA.

5.1.2 Modelado y simulación.

Una vez se obtuvieron los datos necesarios del cuarto de secado, se empieza con el modelado y diseño de éste, para posteriormente ser llevado al software que se usará para las simulaciones correspondientes y de esta forma identificar las falencias del cuarto de secado para proponer modificaciones que permitan optimizar el proceso de secado.

5.1.2.1 Modelado.

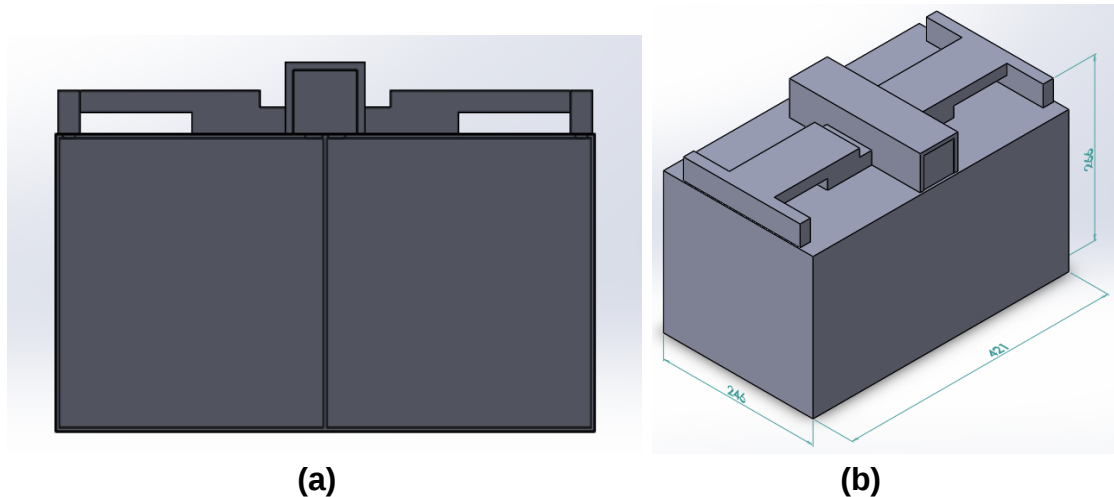


Figura 15: Diseño del cuarto original y dominio (Medidas en cm).

Con la ayuda del software SolidWorks se lleva a cabo el modelado del cuarto de secado original con las respectivas medidas obtenidas en el momento de la visita a la empresa, teniendo como finalidad el diseño que se observa en la Figura 15 (a).

También se emplea un dominio computacional, con el fin de observar en la simulación el fluido que se encuentra dentro de éste, cuyas medidas son 246 cm de ancho, 266 cm de alto y 421 cm de largo. Teniendo en cuenta también la condición de frontera como lo es la velocidad con la cual se desplaza el fluido en el entorno, Figura 15 (b).

Simulación del cuarto original.

Para garantizar un mallado de alta calidad en una superficie, sólidos, fluidos, etc. Se utilizan cuatro criterios de calidad que se definen de acuerdo con *Ansys Fluent* como son: *Skewness*, *Aspect ratio*, *Orthogonal Quality* y *Maximum Corner Angle*. Los datos arrojados para cada uno de los criterios de este proyecto se pueden apreciar en la tabla 5.

Skewness: Se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. En la tabla 8 se aprecia los valores de *Skewness* según el criterio de calidad.

Tabla 5: Criterio de calidad Skewness.

Skewness: Espectro de las métricas de malla					
Excelente	muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable

0 - 0.25	0.25 – 0.50	0.50 – 0.80	0.80 – 0.94	0.95 – 0.97	0.98 - 100
----------	-------------	-------------	-------------	-------------	------------

Aspect ratio: Es la proporción entre la línea más larga sobre la línea más corta del elemento y por último se define como el valor ideal de *Aspect ratio* de uno para un triángulo equilátero. Además, también existen varios factores que ayudan a determinar la calidad y la fiabilidad de los resultados de la simulación CFD, uno de ellos es Y+, definido como una longitud adimensional perpendicular al punto más cercano a la pared, donde se evalúa la velocidad de fricción, este parámetro se emplea para describir la resolución de la malla en estudio.

Orthogonal Quality: El cual se calcula usando el vector normal de la cara, el vector del centroide de la celda a cada una de las celdas adyacentes y el vector del centroide de la celda a cada una de las caras. En la tabla 9 se puede apreciar los valores de *Orthogonal Quality* según el criterio de calidad.

Tabla 6: Criterio de calidad *Orthogonal Quality*.

Orthogonal Quality: Espectro de las métricas de malla					
Inaceptable	malo	Aceptable	Bueno	muy bueno	Excelente
0 – 0.001	0.001 – 0.14	0.15 – 0.20	0.20 – 0.69	0.7 – 0.95	0.95 – 1.00

Maximum Corner Angle: Permite determinar los ángulos entre caras, este criterio de ángulo mínimo y máximo se calcula utilizando la posición de sus nodos en una esquina. El ángulo máximo para un triángulo equilátero es de 60°, mientras que Fluent establece el límite de ángulo en 30°. (Trujillo 2020)

En la tabla 5 se puede apreciar los detalles del mallado que se utilizó para llevar a cabo la simulación en el software ANSYS. De acuerdo con los criterios de calidad especificados en las tablas 8 y 9 que define una malla con buena calidad. La malla que se utiliza para estas simulaciones cumple con los criterios de calidad propuestos, por ende, se puede llevar a cabo la simulación correspondiente de del modelo original del cuarto de secado de pasta.

Tabla 7: Valores del estudio de convergencia de malla.

Tipo de elementos	Triangular
Tamaño del elemento	0.05 m
Calidad del elemento promedio	0.82096 m
<i>Aspect ratio</i> promedio	1.9282
<i>Máximum Corner Angle</i>	96.912°
<i>Skewness</i>	0.25153
<i>Orthogonal Quality</i>	0.74708
Número de elementos	2654210
Número de nodos	3373504

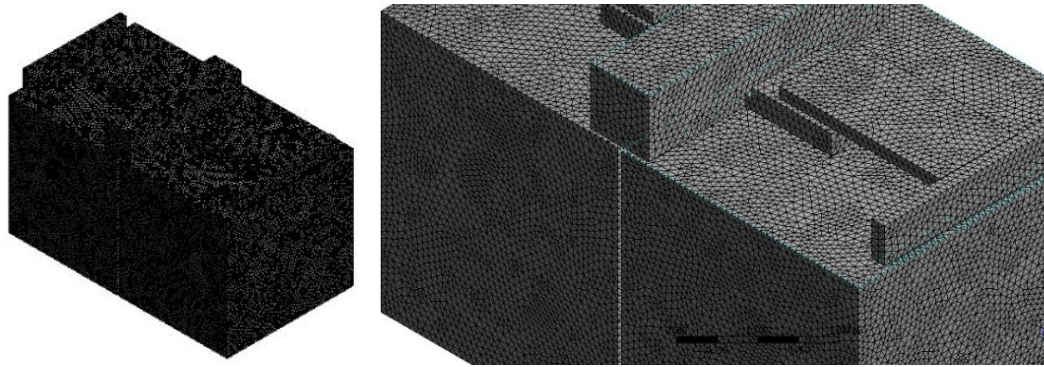


Figura 16: Mallado del modelo original.

La figura 16 se aprecia el mallado obtenido mediante ANSYS del cuarto original, el enmallado permite definir los elementos y nodos con los que se contará para llevar a cabo la simulación, cuenta con una malla estructurada en forma triangular y una distancia entre nodos de 0.05 m como se aprecia en los detalles de malla que aparecen en la tabla 10.

El cuarto de secado cuenta con dos motores exactamente iguales, los cuales hacen circular el fluido por los ductos y las cámaras de secado, se hicieron dos simulaciones para el cuarto original.

La primera simulación se realizará con los dos motores encendidos para ver el comportamiento del fluido.

La segunda solo con el motor de la derecha encendido para observar el comportamiento del fluido. Las dos simulaciones empleadas se llevan a cabo bajo las mismas propiedades y mallado para poder observar y diferenciar mejor los resultados entre ellas.

La simulación se lleva a cabo en el software ANSYS, para este paso se tienen en cuenta los diferentes datos obtenidos por medio del tubo de Pitot para que el resultado se asemeje lo más posible a lo que sucede en el cuarto al momento de ponerlo en funcionamiento.

En la simulación se utilizó Fluent CFX, puesto que, según diversos autores, es el modelo que más se asemeja al comportamiento del aire cuando es sometido a un movimiento forzado en un entorno y por medio de ductos. (Gao et al. 2018; Lu and Lu 2016; Mann and Singh 2020; Mi 2020).

Se utiliza también una turbulencia del fluido del 5% (predeterminada) para llevar a cabo el proceso de simulación. (Gao et al. 2018).

Tabla 8: Propiedades del fluido

PROPIEDADES DEL FLUIDO (AIRE)	VALOR
Temperatura	22.5 °C – 295.65 K
Densidad	1.194 kg/m ³
Calor Específico	1007 J/kg·K
Conductividad Térmica	0.025325 W/m·K
Viscosidad Dinámica	1.837e-05 kg/m·s
Velocidad de Entrada	4.59 m/s
Presión de Salida	14.07 Pa

En la tabla 6 se pueden apreciar las propiedades del fluido que se trabaja, en este caso el aire a una temperatura de 22.5 °C (medición tomada en el sitio de trabajo).

5.1.2.2 Convergencia de malla.

Para definir el mallado con el cual se harán las simulaciones correspondientes para este estudio, se realiza un estudio de convergencia de malla, este estudio ayudará a definir un tamaño de malla adecuado para las simulaciones que se realizaran para este proyecto, también el número de iteraciones necesarias para que el modelo converja y los parámetros de calidad de la malla. Todo esto teniendo en cuenta una variable de control, la cual en este caso será la velocidad del fluido en el ducto de salida.

Tabla 9: Datos de convergencia de malla.

Nombr e	P2 - tamaño de los elementos de malla (m)	P1 - velocidad de salida – op (m/s)
DP 0	0.8	4.5687093

DP 1	0.7	4.5787018
DP 2	0.5	4.5935212
DP 3	0.4	4.584188
DP 4	0.3	4.5862317
DP 5	0.2	4.5843375
DP 6	0.1	4.5802714
DP 7	0.08	4.5779594
DP 8	0.06	4.5776986
DP 9	0.04	4.775749

Gracias al estudio de convergencia de malla que se llevó a cabo, cuyos datos se observan en la tabla 7, se logra escoger un tamaño de elementos óptimo de 0.08, este valor nos lo refleja los datos obtenidos. Lo que nos dice la tabla es que hacer un refinamiento de malla menor a 0.08 es innecesario, pues que se estaría haciendo un desgaste de maquina mayor por querer hallar valores que van a tener un cambio insignificante, este cambio va a estar alrededor del orden de 1×10^{-3} , por esto es que se decide escoger el tamaño de elemento de 0.08 para este estudio. El tamaño de elemento varía dependiendo también de la capacidad de la maquina con que se cuenta para realizar las simulaciones correspondientes.

5.1.3 Resultados de simulaciones del cuarto original.

5.1.3.1 Simulación del cuarto original con dos motores encendidos.

En la figura 17 se aprecian las vistas frontal e isométrica de los resultados de la simulación del cuarto original, arrojados por el software ANSYS. La simulación se realiza sin carga de pastas, se observa el comportamiento del aire dentro de las recámaras del cuarto de secado cuando los dos motores destinados a mover el aire están encendidos.

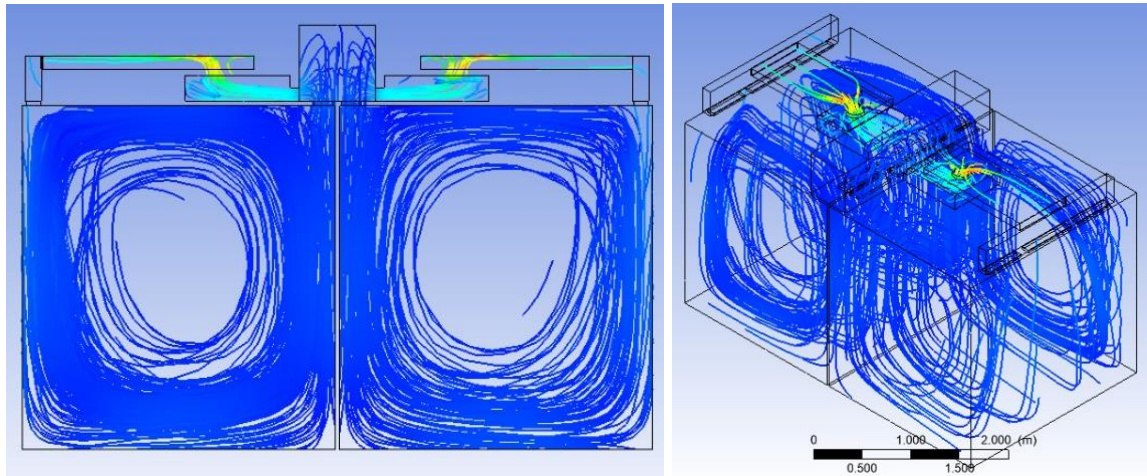


Figura 17: Simulación cuarto con dos motores (número de partículas 100).

Se puede observar que cuando el cuarto está en funcionamiento con los dos motores encendidos el movimiento del fluido cuenta con demasiadas falencias puesto que no circula por diferentes partes de las recamaras o el movimiento es muy mínimo debido a la recirculación que se aprecia, y en gran parte por ese movimiento del fluido que se aprecia es que el producto no obtiene un secado homogéneo en su totalidad.

5.1.3.2 Cuarto original con el motor derecho encendido.

Teniendo en cuenta que las recamaras del cuarto de secado son simétricas en su estructura y cuentan con las especificaciones y componentes iguales, por lo tanto los resultados de las simulaciones para cada recamara son iguales dependiendo del motor que se encienda.

En la figura 18 se puede observar el comportamiento del fluido en las cámaras de secado cuando éste es sometido a movimiento con un motor encendido, se pueden apreciar las diferentes falencias en la distribución del fluido con las que cuenta el cuarto de secado, por lo cual se toma la decisión de someter el cuarto de secado a diferentes cambios para poder corregir la circulación del fluido.

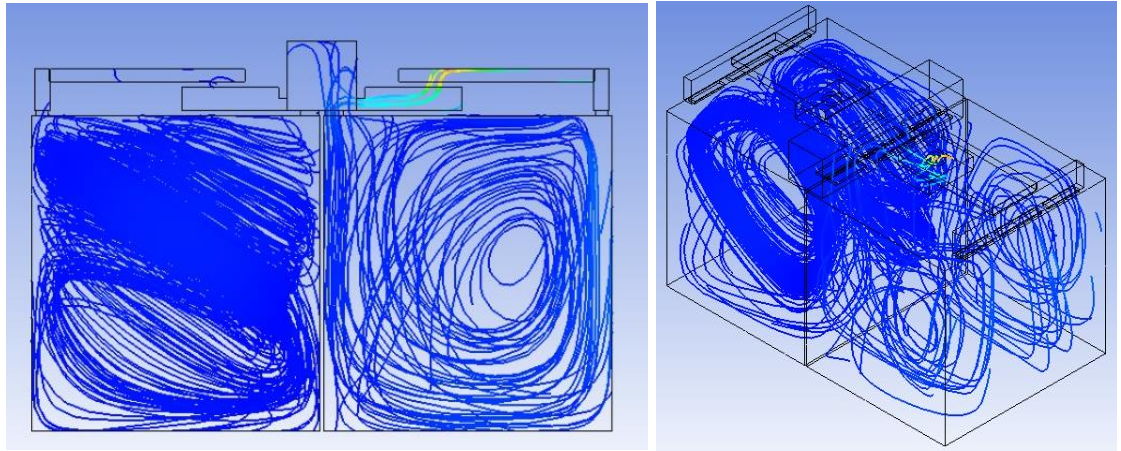


Figura 18: Simulación cuarto con un motor (número de partículas 100).

5.1.3.3 Ductos superiores del cuarto original.

Con el fin de observar más detalladamente lo que sucede en los ductos del cuarto de secado y descartar posibles falencias, se toma la decisión de simular esta parte del cuarto de secado y apreciar el comportamiento del fluido allí. Los parámetros para esta simulación, están establecidos con anterioridad en la tabla 10.

En la figura 19 se puede apreciar que en la esquina del ducto hay una generación de vórtices, por lo tanto, se toma la decisión de realizar una modificación en esta parte, esto con el fin de que la generación de vórtices disminuya, puesto que esto puede ser una de las causas por las cuales el fluido no tiene un movimiento uniforme.

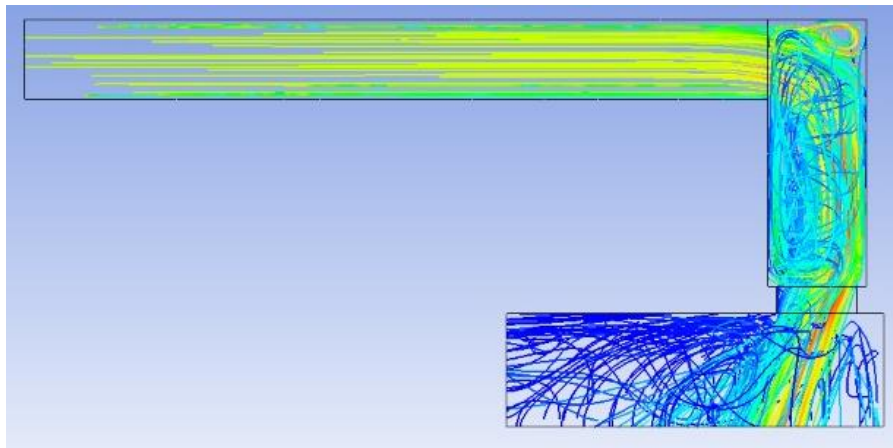


Figura 19: Simulación ducto superior.

5.2 PROPUESTAS DE MEJORAS

5.2.1 Primera propuesta.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación del cuarto original, donde se aprecia que la distribución del aire no es uniforme, se toma la decisión de someter el cuarto a una serie de modificaciones, esto con el fin de mejorar la calidad del fluido, es decir, hacer que el fluido se distribuya más uniformemente por el cuarto de secado, con el fin de mejorar el proceso de extracción de humedad en el cuarto de secado.

5.2.1.1 Rediseño.

Al momento de proponer modificaciones, se debe tener en cuenta que éstas deben ser lo menos invasoras y lo más sencillas posibles, puesto que lo que se busca es optimizar el cuarto que se encuentra en funcionamiento, más no remodelar por completo éste.

En la Figura 20 se proporcionan relaciones del factor de fricción f para flujo laminar totalmente desarrollado en tuberías de varias secciones transversales. El número de Reynolds para flujo en estas tuberías se basa en el diámetro hidráulico $D_h = 4A_c/P$, donde A_c es el área de sección transversal de la tubería y p es su perímetro húmedo. (Çengel and Cimbala 2006)

TABLA 8-1

Factor de fricción para *flujo laminar* totalmente desarrollado en tuberías de varias secciones transversales ($D_h = 4A_c/p$ y $Re = V_{prom} D_h/\nu$)

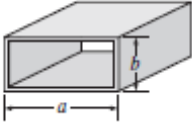
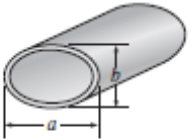
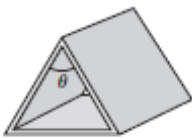
Geometría del tubo	a/b o θ°	Factor de fricción f
Círculo	—	64.00/Re
	a/b	
	1	56.92/Re
	2	62.20/Re
	3	68.36/Re
	4	72.92/Re
	6	78.80/Re
	8	82.32/Re
	∞	96.00/Re
	a/b	
	1	64.00/Re
	2	67.28/Re
	4	72.96/Re
	8	76.60/Re
	16	78.16/Re
	θ	
	10°	50.80/Re
	30°	52.28/Re
	60°	53.32/Re
	90°	52.60/Re
	120°	50.96/Re

Figura 20: Factor de fricción para flujo laminar.

Conservación de la masa.

La relación de conservación de la masa para un sistema cerrado que pasa por un cambio se expresa como $m_{sist} = constante$ o $dm_{sist}/dt = 0$, lo cual es un enunciado del hecho obvio que la masa del sistema permanece constante durante un proceso. Para un volumen de control (VC), el balance de masa se expresa en la forma de razón como:

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (17)$$

Donde $\dot{m}_{ent}$ y $\dot{m}_{sal}$ son las razones totales de flujo de masa hacia dentro y hacia fuera del volumen de control, respectivamente, y dm_{VC}/dt es la razón de cambio de la masa dentro de las fronteras de ese volumen. En la mecánica de fluidos, la

relación de conservación de la masa escrita para un volumen diferencial de control suele llamarse ecuación de continuidad.(Çengel and Cimbala 2006)

Conservación de energía.

La energía se puede transferir a un sistema cerrado, o extraerse de éste por medio de calor o de trabajo, y el principio de conservación de la energía exige que la energía neta transferida a un sistema, o extraída de él durante un proceso, sea igual al cambio en el contenido de energía de ese sistema. Los volúmenes de control incluyen la transferencia de energía también por la vía del flujo de masa, y el principio de conservación de la energía, también conocido como balance de energía, se expresa como:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{VC}}{dt} \quad (18)$$

Donde $\dot{E}_{ent}$ y $\dot{E}_{sal}$ son las razones de transferencia de energía hacia dentro y hacia fuera del volumen de control. En la mecánica de fluidos se suele limitar la consideración sólo a las formas mecánicas de la energía. (Çengel and Cimbala 2006)

Con base en lo anterior, se inicia a diseñar las modificaciones que ayudaran a que la distribución del fluido dentro de las cámaras del cuarto de secado sea más homogénea.

5.2.1.2 Propuesta ducto superior.

Una de las falencias que se aprecian en los resultados de la simulación del cuarto de secado original, es en el ducto superior del cuarto de secado, debido a los vórtices que se aprecian en la figura 19, estos vórtices generan una pérdida de energía en el fluido al recircular en este lugar o chocar demasiado con las paredes del cuarto.

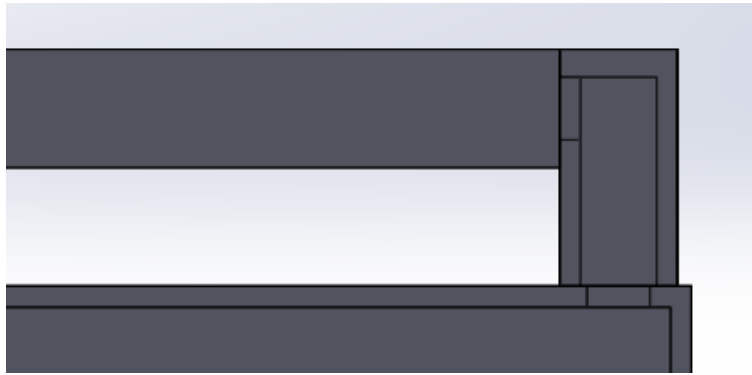


Figura 21: Ducto original del cuarto de secado.

En la figura 21 se puede observar el ducto con el que cuenta el cuarto de secado, al ducto tener un codo en ángulo recto, genera pérdida de energía y vórtices no deseados como se observa en la simulación realizada (figura 19). La generación de pérdida de energía y vórtices afecta al movimiento del fluido por los ductos y por ende a la distribución del fluido dentro de las cámaras del cuarto de secado. Por esto, se toma la decisión de realizar una modificación en este lugar del cuarto de secado.

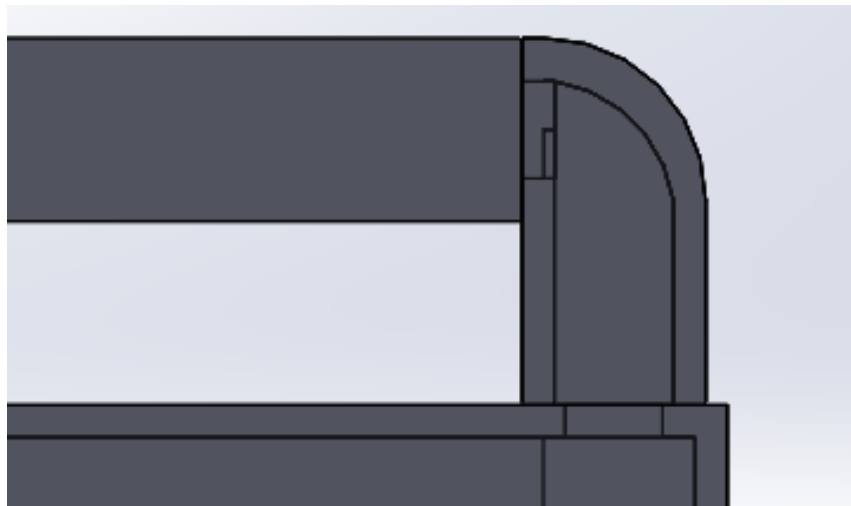


Figura 22: Redondeo propuesto del ducto.

En la figura 22 se aprecia la propuesta de redondeo del ducto, debido a que por su geometría recta ocasionaba demasiada pérdida de energía, creación de vórtices y por ende afectando en el movimiento y la distribución del aire dentro del cuarto, con este redondeo se busca que el fluido (aire) que se encuentra moviéndose dentro del cuarto se comporte de manera más laminar para una mejor distribución en las cámaras de secado.

$$R=r=w$$

Este redondeo fue hecho de acuerdo con la ecuación (19), la cual nos dice que el radio del redondeo del ducto es igual al ancho del ducto por el que circula el fluido, como lo podemos observar en la figura 22, cabe resaltar que para este proyecto el redondeo tendrá un recorrido de 90° exactamente. (Smacna 2006)

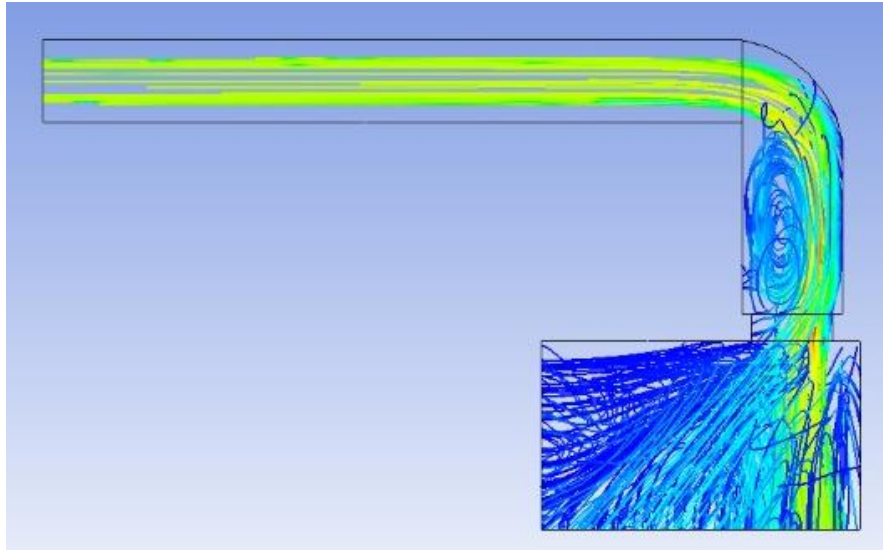


Figura 23: Simulación propuesta ducto superior.

Al observar que la modificación propuesta del ducto superior genera una menor pérdida de energía y una menor generación de vórtices, aunque aún se aprecian vórtices y una mala distribución. Figura 23.

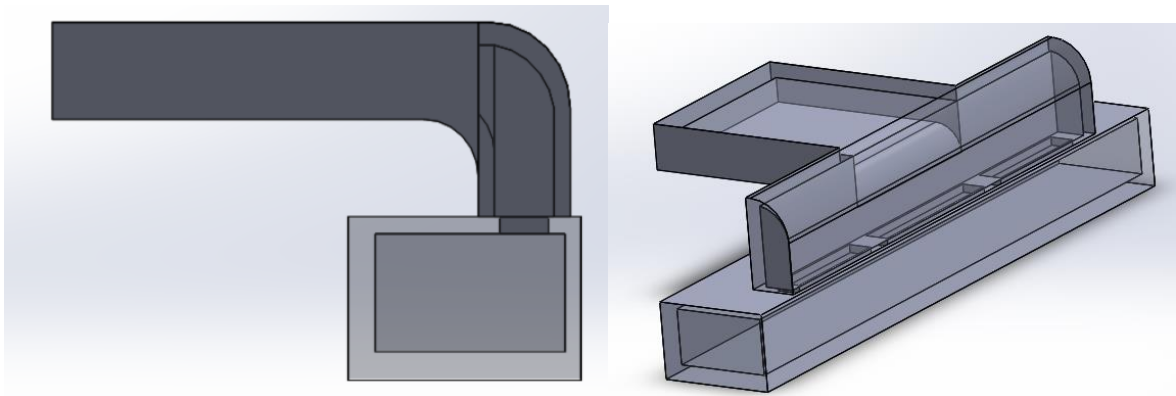


Figura 24: Redondeo propuesto mejorado.

Por esto se toma la decisión de redondear el ducto en la parte inferior de éste para así observar el nuevo comportamiento del fluido cuando circula por el ducto. Figura 24.

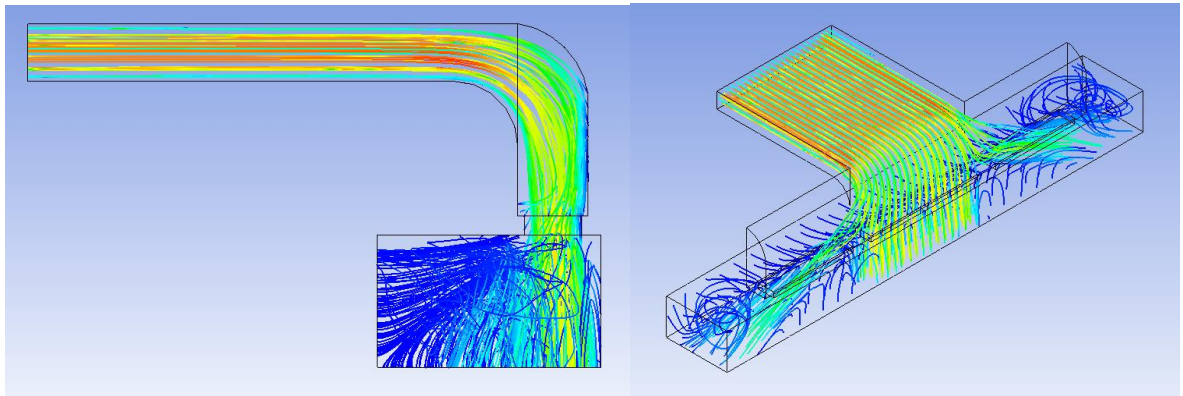


Figura 25: Simulación ducto redondeado.

Después de haber simulado la propuesta de redondeos del ducto superior con el fin de mitigar la pérdida de energía en éste, se logra observar que la fluidez del aire por este ducto mejora significativamente, esto gracias a que el ducto tiene una forma donde haya menos choque del fluido con las paredes, éste fluirá de una manera mucho más continua y con una pérdida de energía menor. Figura 25

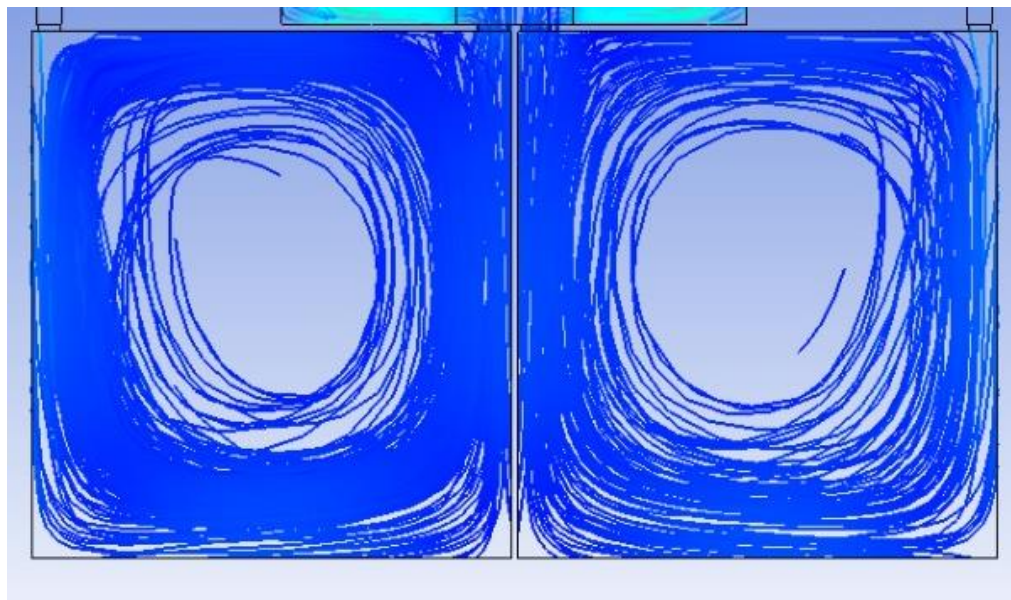


Figura 26: Distribución defectuosa de las cámaras de secado.

Después de haber solucionado la generación de vórtices y pérdidas de energía en el ducto superior, se observa que la siguiente falencia está en la distribución del fluido en las cámaras de secado. Puesto que como se puede observar en la figura 26, la distribución del fluido en éstas es demasiado discontinua sin importar si el cuarto de secado con un solo motor en funcionamiento o con los dos, generando así un proceso de secado de la materia prima muy disparejo. Por esto se procede

a proponer la implementación de ductos para lograr que la distribución del fluido dentro de las cámaras de secado sea más uniforme

5.2.2 Segunda propuesta

La propuesta conta en implementar unos ductos auxiliares, con el fin de que ayuden a distribuir mejor el aire dentro de la cámara de secado.

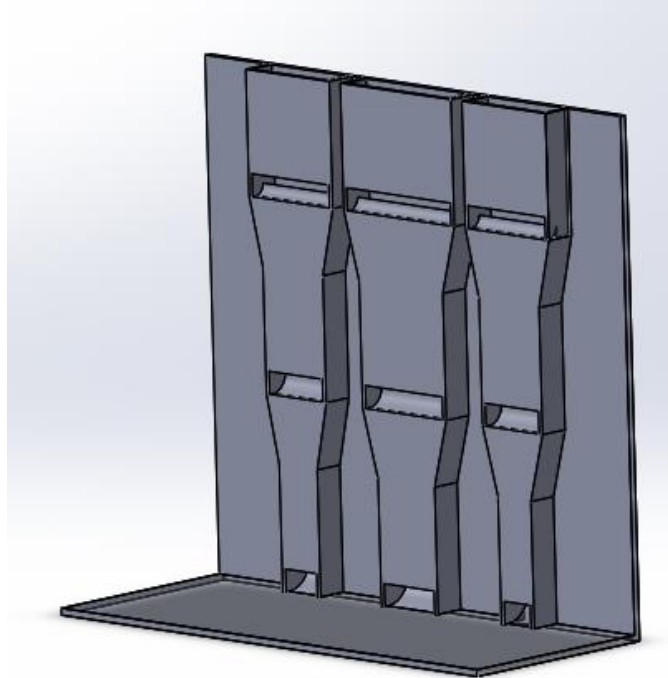


Figura 27: Rediseño del cuarto de secado.

En el rediseño se le agrega al cuarto una serie de ductos con diferentes ranuras y sus respectivas aletas para la redirección del fluido, con el fin de que el aire tenga una mejor circulación al momento de salir del ducto a la cámara de secado (Figura 27), y de esta forma el fluido tenga una mejor distribución.

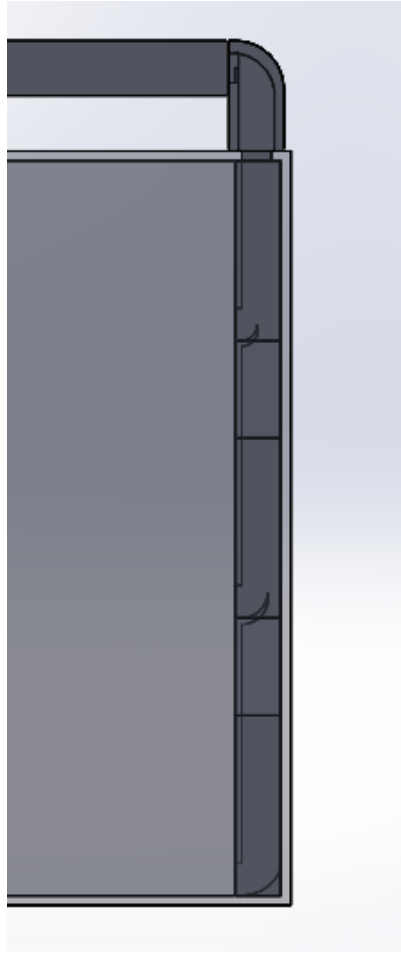


Figura 28: Parte interna de ductos.

En la figura 28 se puede observar los ductos propuestos internamente, se puede apreciar las aletas utilizadas para la redirección del fluido, éstas tienen la función de dirigir el fluido hacia la cámara de secado con el fin de obtener una mejor distribución de éste.

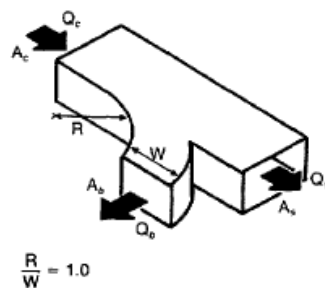


Figura 29: Diseño de salida de aire del ducto.

Los ductos son implementados con el fin de distribuir o transportar un fluido ya sea a una recamara o ambiente. Dichos ductos se diseñan teniendo en cuenta parámetros de diseños de ductos que se encuentran en el libro **HVAC Systems Duct Design (1990)** como se puede observar en la Figura 29, el diseño de las aletas direccionadoras está regida por la fórmula de que $R=W$ que es lo mismo que $R/W=1$ como se puede apreciar en la misma imagen. (Smacna 2006)

Flujo laminar y turbulento.

El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos, a través del flujo. Dichas fluctuaciones proporcionan un mecanismo adicional para transferir movimiento y energía. En flujo laminar, las partículas fluyen en orden a lo largo de trayectorias, y la cantidad de movimiento y la energía se transfieren a través de líneas de corriente mediante difusión molecular. En el flujo turbulento, los remolinos giratorios transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo con mayor rapidez que la difusión molecular, y aumentan enormemente la masa, la cantidad de movimiento y la transferencia de calor. Como resultado, el flujo turbulento está relacionado con valores mucho más altos de coeficientes de fricción, transferencia de calor y transferencia de masa. (Çengel and Cimbala 2006)

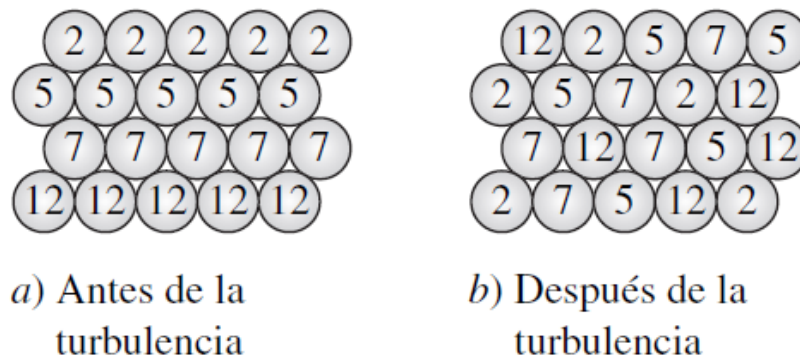


Figura 30: Flujo laminar y turbulento.

En la Figura 30 se puede observar el comportamiento de las partículas de un fluido cuando el flujo es laminar **(a)** y cuando el flujo es turbulento **(b)**, se puede observar que cuando el flujo es turbulento, las partículas no tienen un orden definido y por esto es que se generan los remolinos, los cuales pueden llegar a ocasionar socavaciones dependiendo del fluido y el material por donde se dirigen. (Çengel and Cimbala 2006)

Un numero de Reynolds Re por debajo de 2.300 será flujo laminar y, por encima de 4.000, manifiestamente turbulento. En ingeniería de ventilación, por razones de economía en la sección de las instalaciones, los regímenes de los flujos de aire siempre son turbulentos. (Mazariegos 2007)

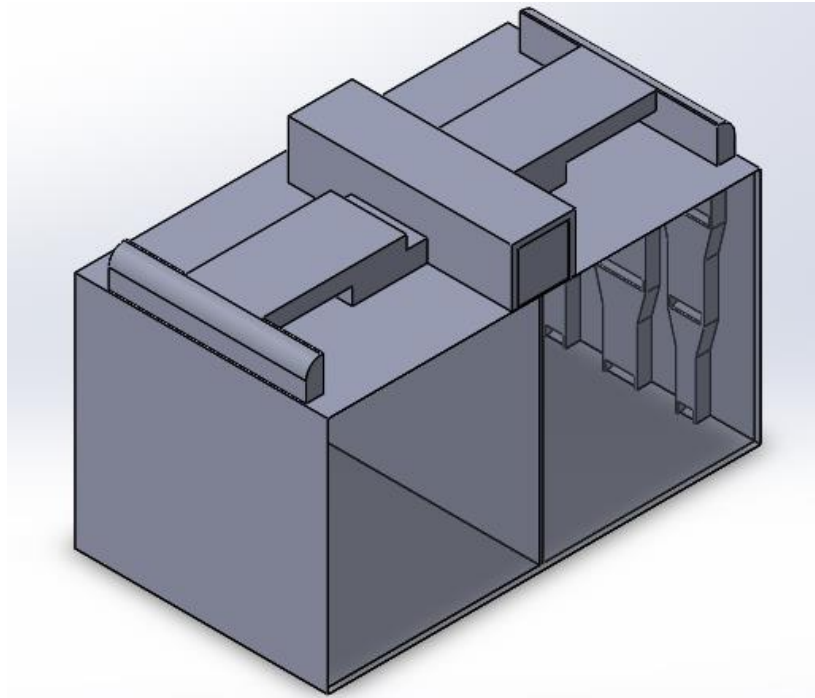


Figura 31: Ductos en el cuarto de secado.

En la figura 31 se puede observar el cuarto de secado con los ductos implementados en él. Los ductos fueron situados en las ranuras de entrada de aire con el fin de que estos distribuyan uniformemente en las cámaras de secado. Los ductos se implementaron en ambas cámaras de secado y al ser éstas simétricamente iguales se comportan igual a ambos lados del cuarto.

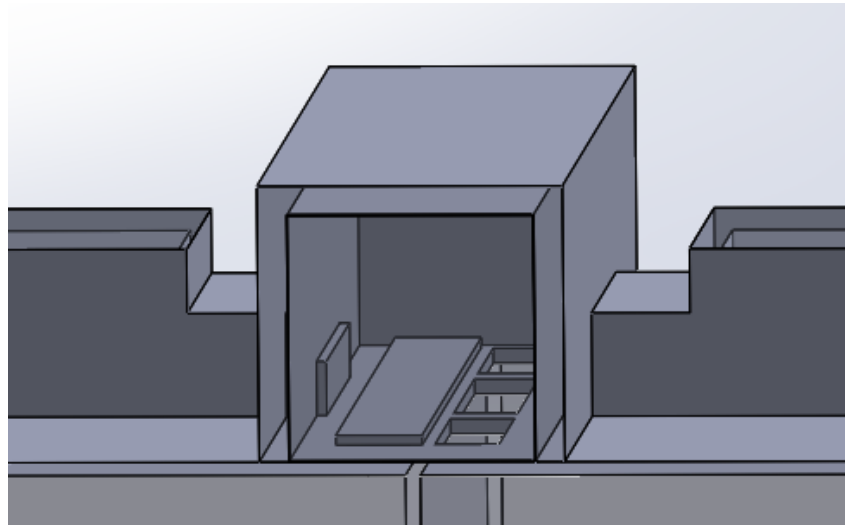


Figura 32: Compuertas para separar las cámaras.

Seguidamente se toma la decisión de implementar compuertas situadas en el ducto superior del cuarto (Figura 32), cuya función es sellar las ranuras por las que se conectan las cámaras de secado con las que cuenta el cuarto de secado, esto con el fin de mitigar el consumo de energía y los costos al momento que se requiera utilizar una sola cámara de secado, de este modo el funcionamiento de ésta no se verá afectada por la cámara de secado aledaña.

5.2.2.1 Mallado para simular cuarto modificado.

Dos cámaras de secado.

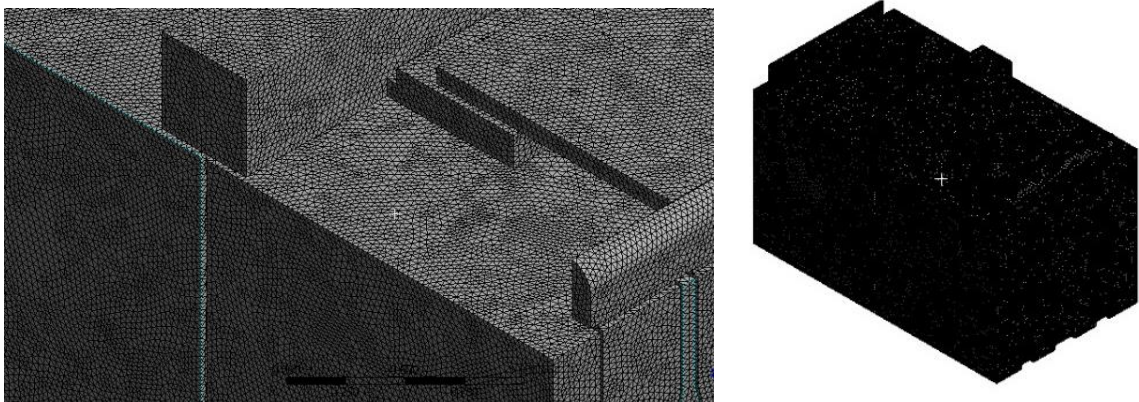


Figura 33: Mallado del modelo modificado (dos motores).

En la figura 33 se observa el mallado de del cuarto cuando este va a ser simulado con los dos motores encendidos para apreciar los resultados de las modificaciones hechas, bajo los detalles de malla que se aprecian en la tabla 10, esto con el fin de

observar la distribución del fluido en caso de que se necesite poner en funcionamiento las dos cámaras de secado si la demanda del producto así lo requiere

Una cámara de secado.

Tabla 10: Detalles de la malla, simulación de una sola cámara.

Tipo de elementos	Triangular
Tamaño del elemento	0.05 m
Calidad del elemento promedio	0.85326 m
Aspect ratio promedio	1.9465
Máximum Corner Angle	96.834°
Skewness	0.26034
Orthogonal Quality	0.8754
Número de elementos	2362011
Número de nodos	3373504

En la tabla 10 se observa los detalles de la malla con la que se contó para simular una sola cámara del cuarto de secado.

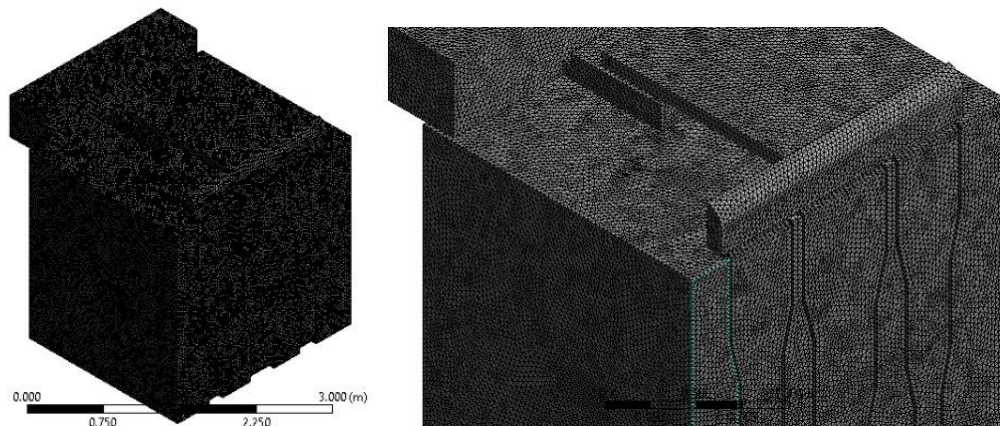


Figura 34: Mallado del modelo modificado (un motor).

En la figura 34 se puede apreciar que el modelo a simular es una sola recámara, esto debido a la propuesta de aislar las dos cámaras y así colocar en funcionamiento un solo motor.

5.2.2.2 Resultados del cuarto modificado.

5.2.2.3 Simulación del cuarto modificado con dos motores encendidos.

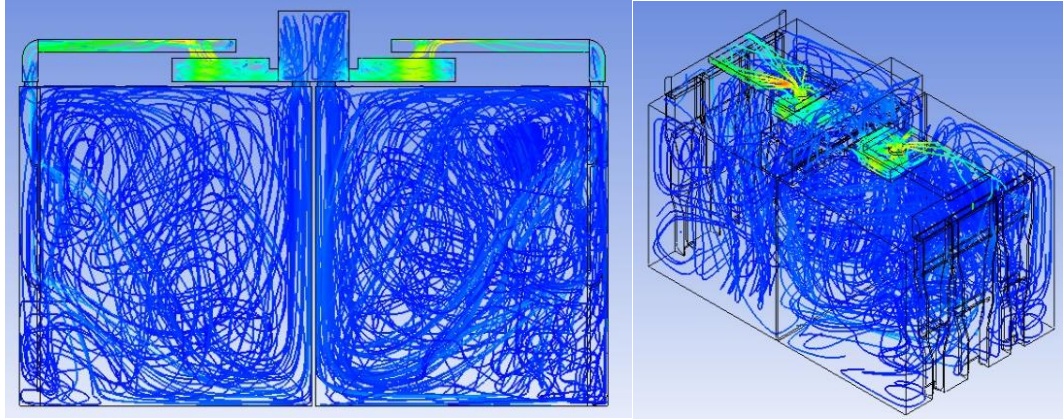


Figura 35: Resultado de simulación cuarto de secado (dos motores).

En la figura 35 se puede apreciar el resultado de la simulación del cuarto de secado después de someterlo a diversas modificaciones, se observa la distribución del aire dentro de las cámaras de secado cuando éste se encuentra en funcionamiento con los dos motores encendidos y las dos cámaras de secado conectadas. Se puede apreciar que la distribución del aire mejoró notoriamente, puesto que se observa que el fluido abarca una gran parte del cuarto de secado.

5.2.2.4 Simulación del cuarto modificado con el motor derecho encendido.

Para poner en práctica la modificación referente a la figura 32, se toma la decisión de simular una sola cámara de secado para observar el comportamiento del fluido en ésta. A continuación, se puede observar el resultado (Figura 36).

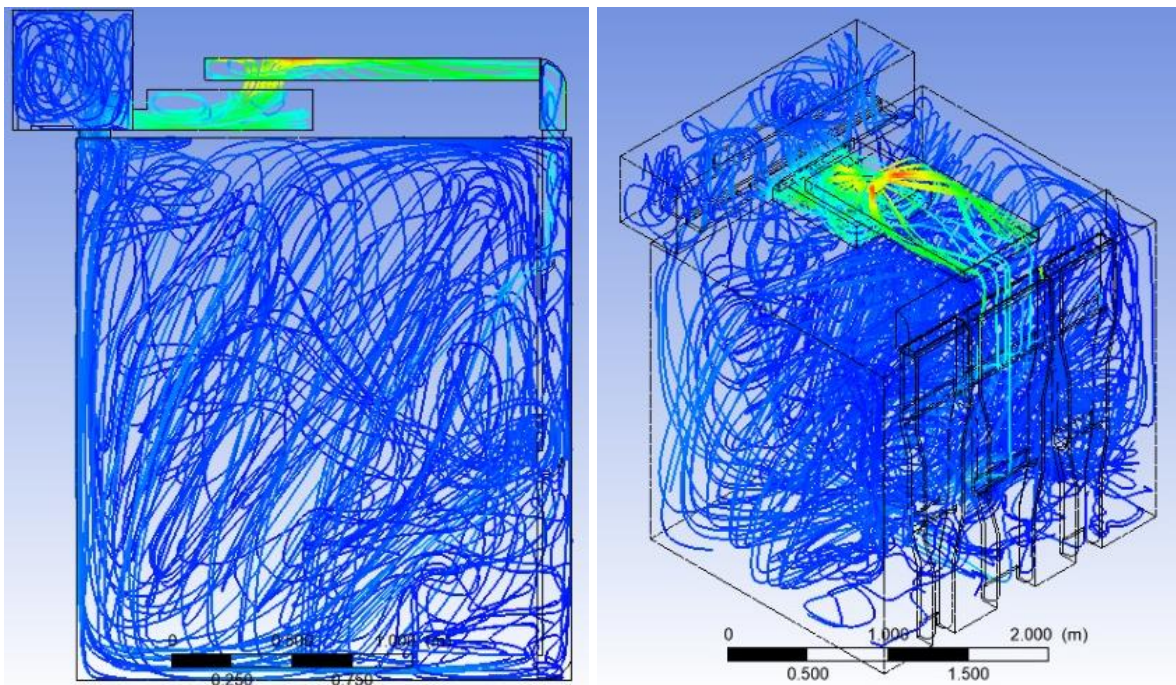


Figura 36: Simulación cuarto modificado (motor derecho).

En la figura 36 se puede ver el resultado de la simulación del cuarto de secado con el motor derecho encendido y en esta simulación se puede apreciar una mejora significativa en cuanto a la distribución del aire dentro de la camada de secado, esta modificación se puede utilizar de acuerdo a la demanda del producto. Esto con el fin de minimizar gastos cuando la demanda del producto sea baja, de esta forma solo se utilizará una sola cámara de secado si así lo requiriera la empresa.

5.2.3 Tercera propuesta.

5.2.3.1 Modificación del ducto superior.

Como se dejó en claro al principio del proyecto, se busca optimizar la distribución del fluido en el cuarto de secado de la empresa Pieros Pastas. Pero esto se busca realizar tratando de que la empresa tenga los menores gastos posibles y que los cambios en el cuarto sean lo menos invasores posibles para éste.

Sin embargo, se realizó un estudio donde se realiza el cambio total del ducto superior del cuarto de secado en ambas cámaras, buscando que el cuarto siga con su geometría simétrica.

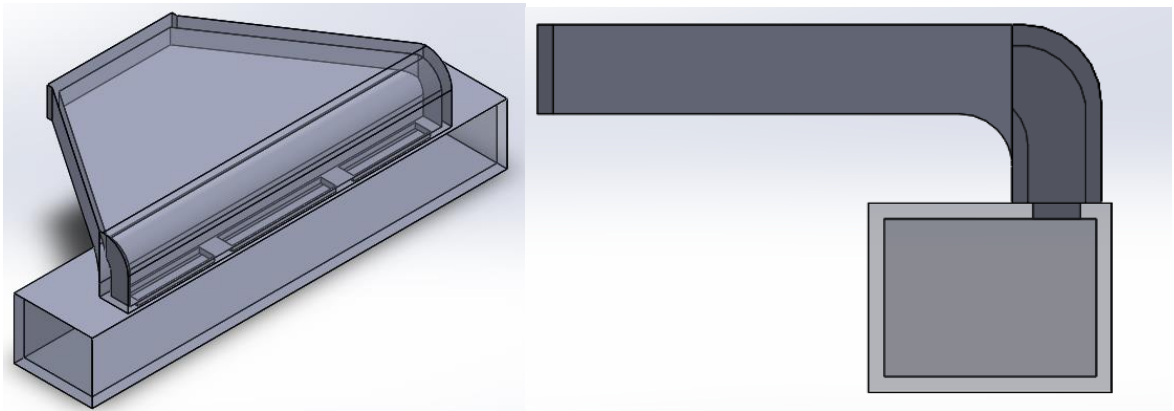


Figura 37: Propuesta de ducto con ampliación.

El cambio que se propuso en el ducto superior se observa en la Figura 37. Como se puede apreciar, el cambio en la parte superior es significativa, puesto que se diseña un ducto con una ampliación para que el aire circule hacia la totalidad de las entradas de aire de las cámaras donde se sitúa la materia prima. Para éste nuevo ducto propuesto se mantiene la propuesta de los redondeos en el ducto superior al igual que los ductos de distribución dentro de la cámara de secado.

5.2.3.2 Diseño del cuarto con propuestas hechas.

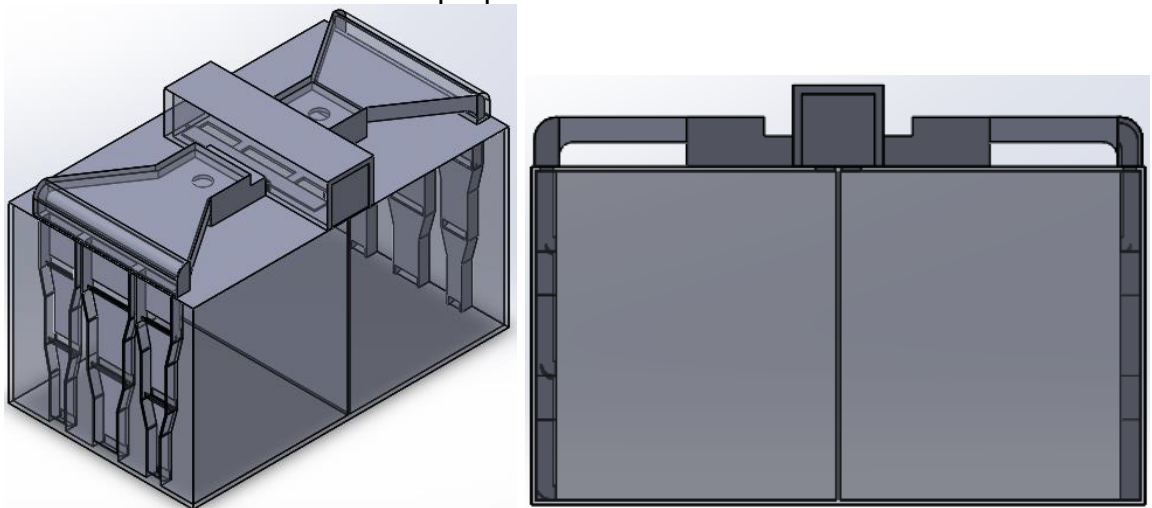


Figura 38: Modelo de cuarto con ducto ampliado.

En la Figura 38 se aprecia el modelo final donde se implementa la ampliación del ducto superior.

A continuación, se apreciarán los resultados de las simulaciones de esta última propuesta para validar su distribución.

5.2.3.3 Simulación ducto superior modificado.

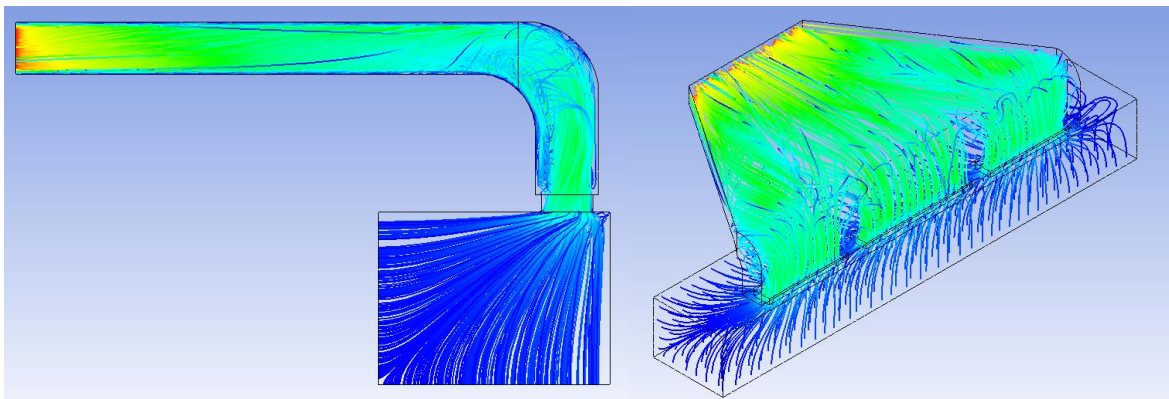


Figura 39: Simulación ducto ampliado.

En la Figura 39, se aprecia que la distribución en el ducto superior, al igual que en las entradas de aire hacia la cámara de secado es la mejor que se ha obtenido durante este proyecto, puesto que se observa que el flujo es mucho mayor y la distribución es más uniforme por los 3 ductos de admisión hacia la cámara de secado.

5.2.3.4 Simulación cámara de secado modificada.

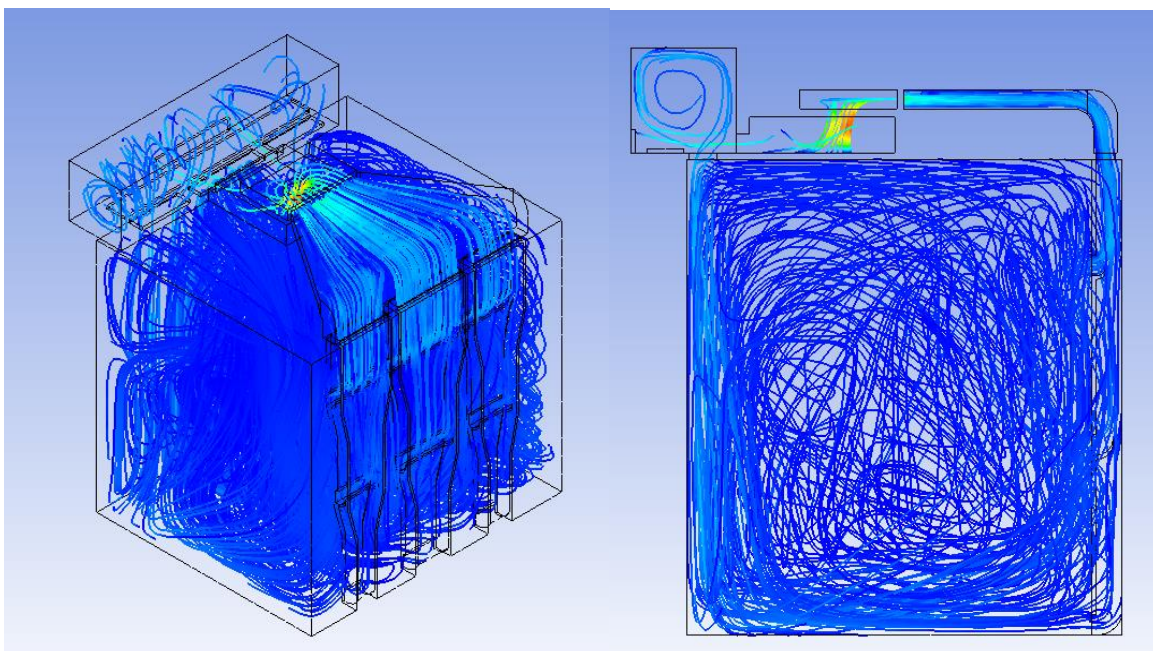


Figura 40: Simulación cámara de secado derecha (motor derecho encendido).

En la Figura 40 se aprecia la distribución del aire en la cámara de secado con la implementación de la ampliación del ducto superior. Se puede observar que la distribución en la cámara de secado es más uniforme que en las anteriores simulaciones.

Teniendo en cuenta esto se llega a la conclusión de que este diseño es el más óptimo para mejorar la distribución en el cuarto de secado. Pero por el hecho de que la remodelación para la creación de este diseño es más costosa y más invasora para el cuarto de secado, se deja a decisión de la empresa cual le parece mejor para la optimización del cuarto.

5.3 PERDIDA DE ENERGÍA EN LOS DUCTOS

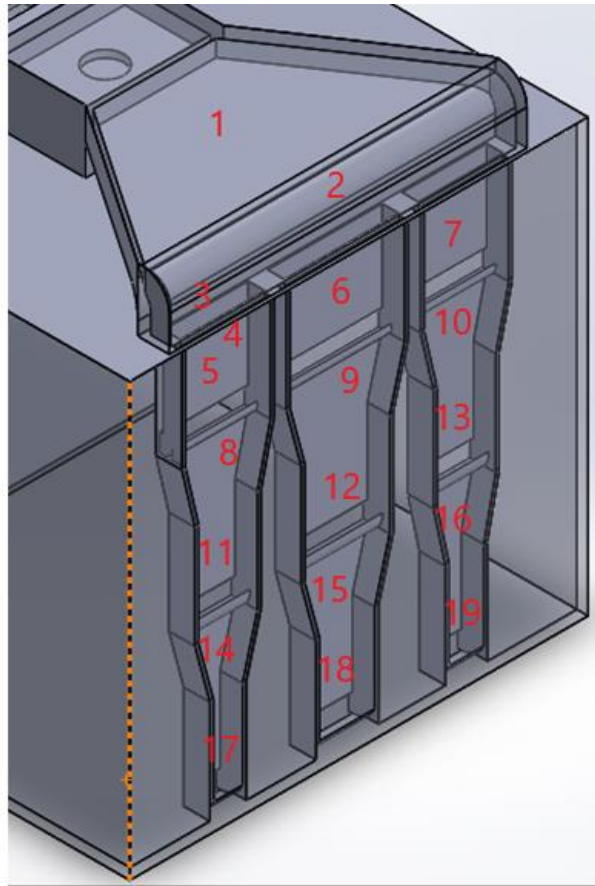


Figura 41: Secciones de pérdidas en los ductos.

En la Figura 41 se puede apreciar las secciones donde ocurren pérdidas de energía del fluido a lo largo de su recorrido por los ductos propuestos en este proyecto.

Tabla 11: Valor de perdida por sección.

SECCIÓN DEL DUCTO	VALOR DE PERDIDA (m)
SECCIÓN 1	0.07
SECCIÓN 2	0.3
SECCIÓN 3 x3	0.48
SECCIÓN 4 x3	0.5742
SECCIÓN 5	0.7558
SECCIÓN 6	0.7063
SECCIÓN 7	0.7558
SECCIÓN 8	0.125
SECCIÓN 9	0.115
SECCIÓN 10	0.125
SECCIÓN 11	0.1481
SECCIÓN 12	0.7558
SECCIÓN 13	0.1481
SECCIÓN 14	0.2

SECCIÓN 15	0.1375
SECCIÓN 16	0.15
SECCIÓN 17	0.11427
SECCIÓN 18	0.08604
SECCIÓN 19	0.10447
PERDIDA TOTAL	5.85138

En la tabla 11 se aprecian las perdidas en las secciones de los ductos propuestos, las ecuaciones utilizadas se pueden apreciar en la sección 4.2.4.6 que hace referente a las perdidas en un sistema.

6. CONCLUSIONES

Observando los resultados de la simulación del cuarto original, se parecía que el cuarto de secado con el que cuenta la empresa Pieros Pasta tiene diversas falencias en su estructura como lo son la generación de vórtices en sus ductos originales y la mala distribución del fluido dentro de las cámaras de secado, lo que genera pérdidas tanto para la empresa como de materia prima también.

Con la implementación de los ductos en las cámaras de secado, se obtiene una mejor distribución y más homogénea dentro de éste, de esta forma la extracción de humedad de la materia prima será mucho más óptima y uniforme dentro de las cámaras de secado.

Debido a que la producción de pasta en la empresa no siempre es igual, se opta por separar las cámaras de secado, para que de esta forma se pueda apreciar el comportamiento de las cámaras de secado cuando están separadas, puesto que al no estar separadas el fluido de la cámara aledaña interactúa con el funcionamiento de la que se encuentra encendida y esta también es una causa de que el fluido no se distribuya homogéneamente.

Gracias a las diferentes modificaciones se puede apreciar que se logra cumplir con la optimización de la distribución del fluido dentro de las cámaras del cuarto de secado, obteniendo así una distribución del fluido mucho más homogénea en éste, puesto que como se observa, el fluido alcanza a desplazarse mejor por el entorno requerido.

Con este proyecto se trató de que las propuestas realizadas, fueran lo menos invasoras posibles para el cuarto de secado ya existente, mitigando de esta manera gastos para la empresa al tener que cambiar o remodelar en gran parte el cuarto de secado.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda separar las cámaras de secado por medio de compuertas en los ductos de extracción de aire, esto es útil al momento de que se necesite poner en funcionamiento una sola cámara de secado según la demanda del producto, de esta manera la cámara de secado que no se esté utilizando no afectará en la distribución del aire de la cámara que si se encuentra en funcionamiento.

Se recomienda a la empresa utilizar un método convencional para la adición de energía al fluido, como lo es el uso de resistencias eléctricas, puesto que este método no produce emisión de gases que puedan contaminar el producto al que se le busca extraer la humedad, de esta manera se obtendrá un producto de mejor calidad y sin contaminación.

Al momento de implementar los ductos en el cuarto de secado se recomienda manejar el mismo material y espesor con el que ya se encuentran diseñadas las paredes de éste.

Se recomienda que, al momento de adicionar el movimiento del fluido, se haga de manera uniforme para que el ducto tenga en toda su área una velocidad uniforme, buscando así que el fluido sea laminar con una velocidad uniforme.

Se recomienda implementar un sistema donde se pueda moderar las revoluciones de los motores, para que de esta forma se pueda controlar la velocidad del aire con la que se requiere trabajar dentro de las cámaras de secado.

Si se desea aportar una mejora a este proyecto se recomienda implementar el uso de la adición de temperatura y manejar los diseños propuestos en este proyecto.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, Karime. 2007. "Elaboración De Una Pasta Alimentaria a Partir De Sémolas De Diferentes Variedades De Cebada." *Universidad Autonoma Del Estado de Hidalgo* 129.
- Aranda, Víctor Luis Cámara. 2017. "Diseño y Construcción de Un Sistema de Ductos Para La Climatización Zonificada de Un Invernadero de Fresa."
- Brasil Maia, Cristiana, André Guimarães Ferreira, Luben Cabezas-Gómez, Sérgio de Moraes Hanriot, and Tiago de Oliveira Martins. 2012. "Simulation of the Airflow Inside a Hybrid Dryer." *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 10(March):382–89.
- Çengel, Yunes A., and John M. Cimbala. 2006. *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. Mexico.
- D. Reay, C. G. J. Baker. 2002. "Capitulo V. Proceso de Secado."
- Fernando Ortiz Garces, Gerardo Ortiz Garces. 1994. *Calculo y Diseño de Un Cuarto de Secado de Madera*.
- Figueroa, Isaac Pilatowsky. 2014. *Psicrometría, Metodos de Humidificacion y Dehumidificacion y Sus Aplicaciones En El Diseño Arquitectónico*.
- Gao, Ran, Kaikai Liu, Angui Li, Zhiyu Fang, Zhigang Yang, and Beihua Cong. 2018. "Biomimetic Duct Tee for Reducing the Local Resistance of a Ventilation and Air-Conditioning System." *Building and Environment* 129(December 2017):130–41. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.023.
- Gauthier, George P., Graeme M. G. Watson, and Jeffrey M. Bergthorson. 2014. "Burning Rates and Temperatures of Flames in Excess-Enthalpy Burners: A Numerical Study of Flame Propagation in Small Heat-Recirculating Tubes." *Combustion and Flame* 161(9):2348–60. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.02.011.
- Gil, Gil Juan Dario. 2013. "Caracterización Del Proceso de Secado de Madera Para Uso Industrial." 86.
- Guncay, Isabel Margarita Aguilar. 2017. "Optimización Del Proceso de Secado En Pastas Alimenticias." *Occupational Medicine* 53(4):130.
- Lu, Hao, and Lin Lu. 2016. "CFD Investigation on Particle Deposition in Aligned and Staggered Ribbed Duct Air Flows." *Applied Thermal Engineering* 93:697–706. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.030.
- Mann, Harjeet S., and Pradeep K. Singh. 2020. "Energy Recovery Ducted Turbine (ERDT) System for Chimney Flue Gases - A CFD Based Analysis to Study the Effect of Number of Blade and Diffuser Angle." *Energy* 213:118501. doi: 10.1016/j.energy.2020.118501.
- Mazariegos, Edwin. 2007. "Diseño e Instalación Del Sistema de Ductelería Para La

- Distribución de Aire Acondicionado Dado Por Cuatro Mannejadoras En Almacenes Carrión.”
- Mendoza, Lenin Tarrillo. 2017. “Diseño de Un Prototipo de Secador Homagáneo de Frutas Utilizando Flujo Controlado de Aire Caliente.”
- Mi, Bai gang. 2020. “Numerical Investigation on Aerodynamic Performance of a Ducted Fan under Interferences from the Ground, Static Water and Dynamic Waves.” *Aerospace Science and Technology* 100:105821. doi: 10.1016/j.ast.2020.105821.
- Ploteau, J. P., V. Nicolas, and P. Glouannec. 2012. “Numerical and Experimental Characterization of a Batch Bread Baking Oven.” *Applied Thermal Engineering* 48:289–95. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.060.
- Pulido, Juan Manuel Tizón. 2019. “Seminario de Simulación Numérica En Sistemas de Propulsión.”
- Sanz Hernán, Silva. 2018. “Validación de Un Modelo de Turbulencia Simplificado Para La Caracterización Térmica de Edificios.”
- Smacna. 2006. “Hvac Systems Duct Design.” *Smacna*.
- Sorolla, Pedro Fito Maupoey Ana María Andrés Grau José Manuel Barat Baviera Ana María Albors. 2016. “Introducción Al Secado de Alimentos Por Aire Caliente.”
- Trujillo, Diego Fernando Flórez. 2020. “Análisis Mediante Dinámica De Fluidos Computacionales De Un Perfil Aerodinámico Para Un Vehículo Tipo Fórmula Sae.” *Sustainability (Switzerland)* 1–99.
- Vázquez, L., M. Vizcarra, A. Salazar, A. Castillo, and I. Guerrero. 2006. “Effect of Heat Treatment on the Industrial Quality of Two Varieties of Mexican Wheat.” 2912. doi: 10.1081/JFP-100108645.
- Vinet, Luc, and Alexei Zhedanov. 2011. “Diseño y Construcción de Una Cámara Para El Secado de La Madera.” *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 44(8):1–15. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- Watson L. Vargas, Carlos A. Riaño Lyda M. Pineda. 2005. “Ambientes Virtuales Para La Enseñanza de La Mecánica de Fluidos: Algunos Ejemplos Simplificados Aplicando ANSYS.” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 1:94–112.