

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO NUMERICO DEL COMPORTAMIENTO
FLUIDODINAMICO Y TERMICO DE UNA CAMARA DE
SECADO TIPO BANDEJA PARA CACAO**

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Presentado por los Bachilleres:

Muñoz P. David M.

Sifontes B. Francisco J.

Para Optar al Título

De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO NUMERICO DEL COMPORTAMIENTO
FLUIDODINAMICO Y TERMICO DE UNA CAMARA DE
SECADO TIPO BANDEJA PARA CACAO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Miguel Baritto

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Presentado por los Bachilleres:

Muñoz P. David M.

Sifontes B. Francisco J.

Para Optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012

ACTA DE GRADO



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

Caracas, 13 de noviembre de 2012

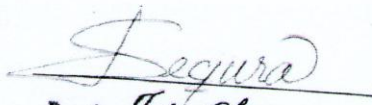
ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

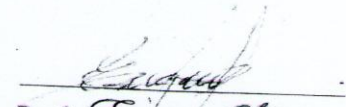
David Muñoz y Francisco Sifontes


Titulado: *"Estudio Numérico de Comportamiento Fluidodinámico y Térmico de una Cámara de Secado Tipo Bandeja para Cacao"*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. *Julio Segura*
Jurado




Prof. *Eugenia Sansone*
Jurado


Prof. *Miguel Baritto*
Tutor

"50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales"

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme y permitir este logro.

A mi Madre por ser un ejemplo de constancia y trabajo duro para alcanzar mis metas, por protegerme en todo momento, guiarme y enseñarme valores desde temprana edad, por siempre darme lo que necesite y su máximo apoyo en todas las cosas, darme sus consejos cuando más lo necesité, además de ser la mejor madre del universo. TE AMO.

A mi Padre por ser además de padre ser mi amigo, enseñarme valores, guiarme, motivarme, creer siempre en mí y apoyarme en todo este viaje universitario.

A mi tía Teresa por ser una segunda madre para mi, por brindarme todo su amor y apoyo durante toda mi estadía en Caracas, enseñarme tantas cosas de la vida y tenerme siempre en sus oraciones.

A mi tío Negro y José Manuel por todo el apoyo brindado antes y después de la realización de este trabajo, ser un ejemplo para mi, su cariño incondicional y sus grandes consejos.

A mis tías Soledad, Cheo, Negro, Rosa Urzua, Margarita, Negra, Zulay y Diadema por sus oraciones y cariño incondicional brindado en todo momento.

A Sabrina por su cariño incondicional, estar siempre pendiente de mí y su apoyo durante la realización de este trabajo.

A mis primos: José Antonio, Carolina, Francia, Jesús Alberto, Josman, Hedy por todo su apoyo en la realización de este trabajo.

A mis compañeros de la Universidad: Cesar, Omar, Tochón, Mana, Raamses, Santoyo, Ari, Andrés, Dixi, Ricardo, Luis, Elvis, Edilberto, Chel, Jon, Alejandro, Alexander, Ángel, Jonathan, John, Félix, Manu, Maybe, Frocho, Venom, Raibel, Kim, Alf, Chino, Pulli, Danny, Snake, Juana, China, Wilmer, Elde; quienes me acompañaron todo este tiempo y me dieron sabios consejos.

RESUMEN

Muñoz P. David M.

Sifontes B. Francisco J.

ESTUDIO NUMERICO DEL COMPORTAMIENTO FLUIDODINAMICO Y TERMICO DE UNA CAMARA DE SECADO TIPO BANDEJA PARA CACAO

Tutores Académicos: Prof. Miguel Baritto. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2012, N° pág. 91

Palabras Claves: *Cacao, Deshidratación, Fluidodinámico, Simulación, Producción.*

El trabajo expuesto es parte fundamental de un proyecto más grande en el cual el objetivo primordial es aplicar la tecnología a los procesos agrícolas del país, en este caso específico nos dirigimos a la producción cacaotera Venezolana, que de ser una actividad de gran orgullo nacional ha ido decayendo en el tiempo, para recuperar esta actividad económica debemos hacerla competitiva. Se planteó realizar simulaciones mediante un software comercial Ansys CFX 10.0 a una cámara de secado tipo bandeja para cacao para observar el comportamiento fluidodinámico y térmico de la misma, de manera que se pudiera llegar a la mejor configuración para así obtener una velocidad de secado uniforme, en el cual fue generado un subdominio de medio poroso en las bandejas que representa los granos de cacao, donde se modela la caída de presión y la transferencia de calor mediante términos fuentes, el término fuente de caída de presión se obtuvo a partir de modelos unidimensionales encontrados en la literatura y el modelo de transferencia de calor que toma en cuenta la transferencia de masa se obtuvo a partir de los resultados unidimensionales de Lopardo y Torres (2012). Las simulaciones se corrieron para diferentes geometrías de la cámara de secado y se obtuvo que la geometría que presenta la menor caída de presión corresponde a un flujo perpendicular al plano de la entrada y paralelo al plano YZ con un difusor de 45° y una tobera en la salida de 22.5° respecto a la horizontal y la geometría donde la mayor caída de temperatura corresponde a flujo perpendicular al plano de la entrada y paralelo al plano XZ con un difusor de 45° y una tobera en la salida de 22.5° respecto a la horizontal.

INDICE GENERAL

ACTA DE GRADO	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 ANTECEDENTES	6
1.3 OBJETIVOS	10
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	10
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.4 ALCANCES	11
CAPÍTULO II.	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 PROCESO DE SECADO DE CACAO	12
2.1.1 Características del producto	12
2.1.2 Descripción del proceso de secado	13
2.2 TIPOS DE SECADO	18
2.2.1 SECADO NATURAL.....	18
2.2.2 SECADO ARTIFICIAL	19
2.2.3 CLASIFICACIÓN DE SECADORES.....	20
2.3 SECADOR DE BANDEJAS	25
2.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	27
2.3.2 CAÍDA DE PRESIÓN	28

2.3.3 TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA.....	29
CAPÍTULO III.....	31
METODOLOGÍA.....	31
3.1 MODELO MATEMÁTICO.....	32
3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DOMINIO DE SOLUCIÓN	33
3.1.2 ECUACIONES DE CONTINUIDAD, DE MOMENTUM Y DE ENERGÍA	35
3.1.3 CONDICIONES DE BORDE.....	41
3.2 MODELO DE VALIDACIÓN.....	43
3.2. SELECCIÓN DEL CASO BASE.....	46
3.3. EVALUACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN Y DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN EL CASO BASE	47
3.4. GENERACIÓN DE CASOS MODIFICADOS.....	48
3.4.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS A VARIAR	48
CAPITULO IV.....	51
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
4.1 Caída De Presión.....	51
4.2 Distribución De Temperatura.....	57
CAPÍTULO IV.....	78
CONCLUSIONES	78
CAPÍTULO VI.....	79
RECOMENDACIONES.....	79
LISTA DE SIMBOLOS.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Varios tipos de cacaos de la especie Theobroma (Miranda, 2011)	13
Figura 1. 2: Proceso básico de Secado	14
Figura 1. 3: Comportamiento del secado de un solido (Miranda, 2011).....	16
Figura 1. 4: Variación de la humedad del solido en el tiempo, a distintas velocidades máxicas de aire (Miranda, 2011).....	16
Figura 1. 5: Variación de la humedad del sólido en el tiempo a distintas humedades del aire (Miranda, 2011)	17
Figura 1. 6: Patios de secado natural.....	19
Figura 1. 7: Secador solar artificial (Bérriz, 1999)	20
Figura 1. 8: Principio de funcionamiento de un secador directo.....	22
Figura 1. 9: Principio de Funcionamiento de un secador indirecto.....	24
Figura 1. 10: Principio de funcionamiento de un secador mixto	24
Figura 1. 11: Típicos diseños de secadores solares.....	25
Figura 1. 12: Secador solar de bandejas.....	27
Figura 4. 1: Diagrama de flujo de la metodología	31
Figura 4. 2: Dominio general de la geometría, donde se remarcan las bandejas con el color azul, con sus dimensiones correspondientes	34
Figura 4. 3: Tabla para determinar la esfericidad y redondez de una partícula. (Santamarina, 2004).	36
Figura 4. 4: Gráfico para determinar la fracción de huecos del lecho, en función de la esfericidad de la partícula ϕ (Levenspiel, 2004).....	37
Figura 4. 5: Caída de presión en la bandeja número uno	38
Figura 4. 6: Distribución de temperatura a lo largo de la cámara de secado.	41
Figura 4. 7: Configuración de las condiciones de borde para todos los dominios utilizados en las simulaciones	43
Figura 4. 8: Ilustración del modelo de validación.....	45
Figura 4. 9: Caso Base	47
Figura 4. 10: Diferentes ángulos de difusor en la entrada.....	48
Figura 4. 11: Diferentes ángulos de la tobera de salida	49
Figura 4. 12: Angulo de incidencia del vector velocidad en plano XZ.....	49
Figura 4. 13: Angulo de incidencia del vector velocidad en plano YZ.....	50
Figura 4. 14: Distribución de presión para el caso 1-4.	52
Figura 4. 15: Distribución de presión para el caso 3-4	54
Figura 4. 16: Distribución de presión para el caso 2-4.	55
Figura 4. 17: Distribución de temperaturas del caso base, con el flujo de entrada perpendicular al plano XY	58
Figura 4. 18: Distribución de temperaturas para el caso 1-4.....	60

Figura 4. 19: Distribución de temperaturas con el flujo de entrada a 45° respecto al plano de entrada, paralelo al plano XZ.....	62
Figura 4. 20: Distribución de temperatura para el caso 3-4.	64
Figura 4. 21: Distribución de velocidad para el caso 1-4.....	65
Figura 4. 22: Distribución de velocidad para el caso 1-1.....	66
Figura 4. 23: Distribución de temperatura con una tobera de salida de 22,5°	67
Figura 4. 24: Distribución de temperatura con una tobera de salida de 45°	67
Figura 4. 25: Líneas de corriente para una velocidad de entrada de flujo perpendicular al plano de entrada.	69
Figura 4. 26: Líneas de corriente para el caso 2-4.	70
Figura 4. 27: Líneas de corriente para el caso 3-4	70
Figura 4. 28: Distribución de temperatura para una velocidad de entrada perpendicular al plano de entrada, caso donde el centro de las bandejas está mas caliente que en los bordes..	71
Figura 4. 29: Distribución de temperatura para el mejor caso con respecto a caída de temperatura, es decir, el caso 2-4.	72
Figura 4. 30: Distribución de temperatura para el caso 3-4.	73
Figura 4. 31: Campo de velocidades para el criterio de pérdida por caídas de presión	75
Figura 4. 32: Campo de velocidades para el criterio de pérdidas por transferencia de calor..	75
Figura 4. 34: Distribución de velocidad con modelo de turbulencia K-epsilon.....	77
Figura 4. 35: Distribución de velocidad para el mismo caso de la figura 4.28 con modelo de turbulencia SST.....	77

INDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1: Casos para las configuraciones diferentes	50
Tabla 4. 2: Caída de presión donde el flujo es perpendicular al plano de la entrada	51
Tabla 4.3: Caída de presión donde el flujo tiene 45° respecto al plano YZ	53
Tabla 4.4: Caída de presión donde el flujo tiene 45° respecto al plano XZ	55
Tabla 4.5: Distribución de temperatura para el caso base	57
Tabla 4.6: Distribución de temperatura donde el flujo es perpendicular al plano XY	59
Tabla 4.7: Distribución de temperatura donde el flujo de entrada entra a 45° con respecto al plano XZ	61
Tabla 4.8: Distribución de temperatura donde el flujo de entrada entra a 45° con respecto al plano YZ.	63
Tabla 4. 9: Tabla comparativa de modelos de turbulencia.....	76

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se encuentra enmarcado en una línea de investigación de energía termo-solar que se está desarrollando en la escuela de Ingeniería Mecánica para aplicaciones de secado de productos agrícolas, el primer capítulo de este trabajo presenta un marco teórico el cual describe los conceptos más importantes para poder entender la realización del mismo, el segundo capítulo presenta la metodología que se utilizó para llevar a cabo el trabajo, el tercer capítulo presenta los resultados que se obtuvieron en el mismo y el análisis de los mismos y el cuarto capítulo presenta las conclusiones del trabajo.

Desde tiempos precolombinos en Venezuela se ha usado el cacao como producto natural para el consumo humano, así lo demuestran en sus crónicas los colonizadores españoles quienes en sus viajes a través del territorio nacional se encontraron con pequeñas plantaciones de cacao hechas por los aborígenes venezolanos, luego en tiempos de la colonia Venezuela fue el principal productor y exportador de cacao para España y el territorio americano, teniendo como principal característica su alta calidad, y así Venezuela con un sistema económico de agro exportación formó una tradición cacaotera donde su principal rubro era el cacao, el cual era de gran demanda ya que se considera de los mejores del mundo, después de esto por distintos factores como por ejemplo el cese del monopolio de exportación con sus principales clientes y la guerra de independencia, esta actividad cayo en decadencia, hablamos del siglo XIX, con la llegada del siglo XX la explotación petrolera y su alta renta para el país, Venezuela reformó por completo su sistema económico, convirtiéndose así en una nación petrolera y desinteresándose cada vez mas por el cacao y exportar productos agrícolas en general así el sector agropecuario cada vez mas desasistido ha bajado su productividad.

En la actualidad se quiere reimpulsar este antiguo orgullo para la nación contribuyendo con el desarrollo agroeconómico, la descentralización y en general la

economía del país, entre las debilidades de la cadena productora se ha identificado la deficiente preparación del productor y la mala transferencia de tecnología para optimizar el proceso y mejorar la calidad, como consecuencia tenemos que la producción es mayoritariamente de forma tradicional e ineficiente con baja homogeneidad en las características de la calidad en el producto.

En concordancia con lo mencionado anteriormente y en orden con los objetivos trazados, se llevan a cabo investigaciones para desarrollar dispositivos tecnológicos en el proceso que pudiera aumentar la eficiencia de la cadena productiva cacaofera de forma sencilla y contundentemente.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cada producto agrícola contiene, después de la cosecha, un cierto grado de humedad que debe ser reducido para facilitar su almacenado. Si se almacenan los productos con el contenido de humedad normal se favorece el crecimiento de microorganismos (hongos, moho, bacterias, etc.) que provocan deterioro sobre los productos. Adicionalmente la calidad de un producto se ve fuertemente influenciada por la cantidad de humedad que contiene antes de emplearse en la fabricación de productos asociados. Esto es particularmente cierto en el caso del cacao, el cual por ejemplo, para ser considerado producto de exportación debe tener una humedad no mayor al 7% surge, entonces la necesidad de secar los productos hasta un grado de humedad que no permita el crecimiento de dichos microorganismos y permita satisfacer ciertos requerimientos de calidad. Este proceso se lleva a cabo hasta un punto de equilibrio con el medio ambiente, es decir, que el producto no intercambia humedad con el medio ambiente.

En la actualidad la producción Venezolana de cacao, se ve afectada por distintos factores ambientales, como lluvias, enfermedades, plagas, etc. que afectan o interrumpen el proceso lo cual repercute directamente en la calidad del producto evitando que dicha producción alcance el mayor nivel de eficiencia. El efecto de estos factores se maximiza gracias al proceso tradicional de secado que sigue la gran mayoría de los productores de cacao a pequeña y mediana escala, el cual consiste en tender el producto al sol en patios de secado.

La técnica tradicional de secado trae como consecuencia que el secado no sea homogéneo y depende del clima, así la calidad mixta del producto empobrece la actividad económica, peor aun en periodos de lluvia, donde la cosecha debe ser recogida de inmediato, deben hacerse pausas en el proceso y se arriesga toda la inversión. Ante este escenario, en la Escuela de Ingeniería Mecánica se lleva a cabo un proyecto para el diseño y construcción de un prototipo de secador solar para cacao, que reduzca los riesgos asociados a la técnica tradicional. Dicho proyecto atiende la intención de promover la implementación de ésta tecnología en las regiones productoras de cacao del país. El dispositivo sujeto a estudio se encuentra conformado por un colector solar, dónde aire ambiente es calentado y forzado a fluir a través de una cámara de secado tipo bandeja, a la cual se encuentra acoplada el colector. Como un aspecto clave en la obtención de un cacao seco de calidad es la homogeneidad del proceso de secado, se requiere que la distribución de temperatura del aire a través de la cámara de secado sea lo más uniforme posible entre bandeja y bandeja, además de que los patrones de flujo presentes no generen elevadas pérdidas de presión, de manera que la potencia requerida por el elemento motor que induce el flujo de aire no sea excesivamente alta.

Actualmente, como parte de la línea de investigación antes mencionada, se encuentra en desarrollo un trabajo, realizado por los bachilleres Torres Gabriel y Lopardo Antonio (2012), donde se plantea un modelo unidimensional que describa el comportamiento fluidodinámico y térmico tanto del colector solar como de la cámara de secado de un deshidratador solar de cacao, particularizando la operación a las condiciones ambientales presentes en Venezuela. Por tratarse de un modelo unidimensional, la descripción de los patrones de flujo dentro de la cámara de secado, y la influencia de la geometría sobre la caída de presión no puede describirse en su totalidad, requiriéndose un modelo tridimensional que permita obtener esta información con fines constructivos del equipo.

En orden con lo dicho anteriormente, en este trabajo de grado se determinará mediante simulaciones numéricas en un modelo tridimensional, la geometría más adecuada para la cámara de secado, de manera de obtener una distribución de temperatura uniforme que garantice un secado homogéneo, satisfaciendo los requerimientos exigidos en la producción de cacao de calidad. . Adicionalmente se evaluará la potencia requerida en el elemento motor que induce el flujo a través de la cámara de secado.

1.2 ANTECEDENTES

El uso de la energía solar ha sido muy importante a través del tiempo, sus inicios se remontan a épocas muy antiguas (siglo III A.C), donde se toma a Arquímedes como la primera persona que la utilizó durante la batalla de Siracusa, en el cual enfrentó a los romanos con espejos hexagonales hechos de bronce para reflejar los rayos solares concentrándolos en la flota romana con el objetivo de destruirla.

Siglos mas tardes, Leonardo Da Vinci también pensó en el uso de la energía solar (año 1515), donde su idea era construir un concentrador de 6 kilómetros de diámetro de base de espejos cóncavos para la producción de vapor y calor industrial.

En el campo agrícola existen muchos usos de la energía solar, el primero es el secado al sol de los vegetales, para su conservación o bien para su transformación, también se utiliza en invernaderos solares, secadores agrícolas, plantas de purificación.

En el año 1996 C. Ratti y A.S. Mujumdar desarrollaron un código de simulación para predecir el rendimiento de lotes de secado de un lecho relleno de partículas, por ejemplo, cilindros o rodajas de zanahorias, manzanas, etc, sometido a las condiciones del aire que varían de tiempo. Este modelo permitió la contracción de las partículas. La entrada de aire y su temperatura depende del tiempo y permite la simulación del caso de un secador solar en el que la temperatura del aire de entrada es necesariamente una función de la hora del día. Todos los parámetros que intervienen en el modelo se obtuvieron de forma independiente a partir de datos experimentales secador solar. Los resultados se comparan bien con los datos experimentales

publicados para el secado solar de zanahoria en cubitos. Efectos de diferentes parámetros clave de este proceso son presentados y discutidos.

En el 2000 R. Abalone, A. Gastón y M.A. Lara Mujumdar, estudiaron el proceso de secado de un producto anisotrópico (batata) por medio de las ecuaciones de Luikov. Estas ecuaciones de transferencia de calor y masa se resolvieron aplicando dos técnicas distintas. En la primera, mediante una transformación de las ecuaciones diferenciales se obtuvo la evolución temporal de la temperatura media y del contenido global de humedad en el producto. En la segunda se resolvió el mismo sistema aplicando el método del elemento finito. A partir de los valores nodales de la temperatura y contenido en la humedad se obtuvieron valores medios que se compararon con los obtenidos en el primer método. Estos modelos fueron utilizados para la determinación de los valores de algunos parámetros característicos del proceso de secado, a partir del ajuste de los resultados numéricos con datos experimentales.

En el año 2006 Juan Maureira diseñó un secador de granos de cacao que funciona con energía solar. Mediante la implementación de un sistema de colectores solares planos se transformará la energía solar en energía térmica. Con el propósito de alcanzar una temperatura de secado de 50° C los colectores solares poseen dos cubiertas transparentes. Se tomó cuenta que al secar cacao a temperaturas superiores a los 60° C se corre el riesgo de generar cambios internos en el producto que tienden a disminuir su calidad como el aumento de la acidez por ejemplo. Un pequeño productor posee aproximadamente 10 hectáreas de terreno cultivado y de cada hectárea se puede extraer un promedio de 400 Kg de cacao, debido a esto el diseño propuesto tiene una capacidad de 500 Kg. Para secar en un tendal esta cantidad de cacao se requeriría cerca de 120 m² de terreno. Gracias a la información contenida en los anuarios meteorológicos que posee el INAMHI se determinó los valores de Heliofanía (horas efectivas de sol) y posteriormente la radiación solar disponible en la

provincia de Guayas, lugar hacia donde va dirigido el proyecto. En el proceso de secado la transferencia de calor se da principalmente por conducción y convección, la convección es forzada ya que se utilizarán dos ventiladores. El aire impulsado por los ventiladores pasa a través de los colectores solares en donde aumentará su temperatura. El aire caliente es guiado hacia la cámara de secado por medio de una sección de transición, cuyo objetivo principal es el de uniformar el flujo de aire en la cámara de secado.

En el 2007 R.S. Costa y Sebastião R. Ferreira construyeron un secador solar en el que se realizaron ensayos de secado de frutos tropicales y desarrollaron el modelado matemático simplificado del proceso. Emplearon un sistema de adquisición de datos y control de temperatura de secador, usando energía de convección forzada de aire y radiación solar. El sistema es complementado, para emergencia, con resistencias eléctricas. Se realizaron experimentos de secado de bananas en forma de placa, obteniéndose sus pesos y contenidos acuosos en función del tiempo. Se realizó el modelado matemático del proceso de secado, con la ecuación de transferencia de materia, obteniéndose la difusividad del agua en los frutos. Los valores obtenidos concuerdan con datos de la literatura y pueden ser empleados en el diseño preliminar del secador. El sistema estudiado entrega información para calcular la cantidad de agua evaporada del alimento para una determinada temperatura promedio del secador solar, la potencia y el tiempo necesarios para el secado.

Para la cámara de secado se diseñó un sistema supervisor y de control del secador eléctrico-solar. Básicamente, en el esquema del aparato de secado hay un colector solar, una cámara de secado, un extractor eólico y un ventilador acoplado a un motor para promover la convección forzada del aire caliente. El aire impulsado por el ventilador se mueve en el colector calentándose, pasando, después, en el compartimiento de resistencias eléctricas, que aportan energía, cuando es necesario

complementar la energía solar, para obtener la temperatura escogida de secado. Entonces, el aire entra en la cámara de secado, en la cual el alimento es secado debido al movimiento del aire caliente, además del aprovechamiento de la energía solar que entra directamente por las paredes de la cámara, ya que ellas son hechas con un polímero transparente. El aire que es succionado por el extractor eólico, sale para el ambiente. El colector solar tiene 5 m de largo y 0,8 m de diámetro, fue hecho con polímero transparente, flexible y su forma es similar a la de un cigarrillo encendido. El colector es liviano si es comparado con colectores clásicamente usados en secado solar; que son generalmente pesados, difíciles de transportar y a veces no removibles.

A mediados del 2008 Juan M. Texeira evaluó un prototipo de deshidratador solar directo de cacao mediante un modelo matemático que considere los efectos de radiación, convección natural y conducción de calor; relacionando estos efectos con las dimensiones del deshidratador. Se propone modelar y simular matemáticamente un prototipo de deshidratador solar directo de cacao. Los resultados arrojados por las simulaciones serán analizados y se espera que este modelo sirva para dimensionar deshidratadores solares directos de cacao que puedan funcionar en diversas localidades.

Actualmente (2012) existe un proyecto llevándose a cabo realizado por Torres Gabriel y Lopardo Antonio, en el cual se modela la operación transitoria de un deshidratador solar para secado cacao, en el cual desarrollan desarrollar un modelo numérico unidimensional transitorio que permite evaluar las condiciones de operación de un sistema de deshidratación solar indirecto por convección forzada, con un colector solar plano. La operación se evaluará a lo largo de un ciclo solar diario bajo condiciones ambientales propias de zonas productoras de cacao en el país.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar, a partir de simulaciones numéricas, el comportamiento fluidodinámico y térmico de una cámara de secado tipo bandeja para cacao, a ser empleada en un prototipo de deshidratador solar.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Recopilar información bibliográfica referente a configuraciones de cámaras de secado tipo bandeja, sus dimensiones en función de la carga, y forma y ubicación de la admisión y escape del aire caliente, así como también a los requerimientos de secado de cacao.
2. Identificar las características geométricas de las cuales dependen principalmente el comportamiento fluidodinámico y térmico de la cámara de secado.
3. Calcular las dimensiones de la cámara de secado en base a la información recopilada y a las condiciones de diseño ya establecidas para el prototipo de secador solar.
4. Generar modelos tridimensionales de la cámara de secado, estableciendo como parámetros las características geométricas previamente identificadas.
5. Realizar simulaciones numéricas de la operación de la cámara de secado para determinar el campo de velocidad, presión y temperatura del aire que fluye a través de la misma, bajo distintas condiciones de operación.
6. Seleccionar, en base a criterios fluidodinámicos y térmicos, las combinaciones de los parámetros estudiados que satisfacen los requerimientos de secado de cacao.

1.4 ALCANCES

En este trabajo se planteó realizar simulaciones numéricas tridimensionales, empleando un código comercial, que permitió evaluar el comportamiento fluidodinámico y térmico de una cámara de secado de cacao. El modelo a ser resuelto se encuentra constituido por las ecuaciones de continuidad, *momentum* y energía para un flujo monofásico (aire). No se modeló la transferencia de masa entre el aire y el cacao a secar, por lo que la disminución de temperatura del aire a medida que fluye a través de las bandejas se modeló a partir de un término fuente en la ecuación de energía, cuya magnitud se estimó a partir de modelos básicos de cinética de secado y humedades de equilibrio.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 PROCESO DE SECADO DE CACAO

En términos generales, se entiende por secado a la eliminación de la humedad de los sólidos (también puede ser un líquido) por evaporación, con ayuda de un agente que transmita el calor necesario para ello, y que a la vez sea el agente transportador de dicha humedad separada. En la mayor parte de los casos la humedad a eliminar es agua y el agente transportador de calor y materia evaporada suele ser una corriente de aire (o gas inerte); aunque también se puede hacer uso de la radiación o la simple conducción de calor a través de una superficie metálica. (Bermudez, 2004)

2.1.1 Características del producto

El producto a utilizar es cacao de tres clases o especies, estas pueden ser indistintamente, cacao criollo, cacao forastero y cacao trinitario o delatano, en la figura 1.1 vemos varios tipos de caca, luego de la cosecha las semillas son sometidas a un proceso de fermentación el cual genera y desarrolla el aroma y sabor, al final de este proceso y partiendo de una humedad aproximada del 55%, los granos se secan al 7%. En el secado también se produce una transformación enzimática el cual termina por complementar el sabor y el aspecto del producto además de garantizar una adecuada conservación de las almendras de cacao.

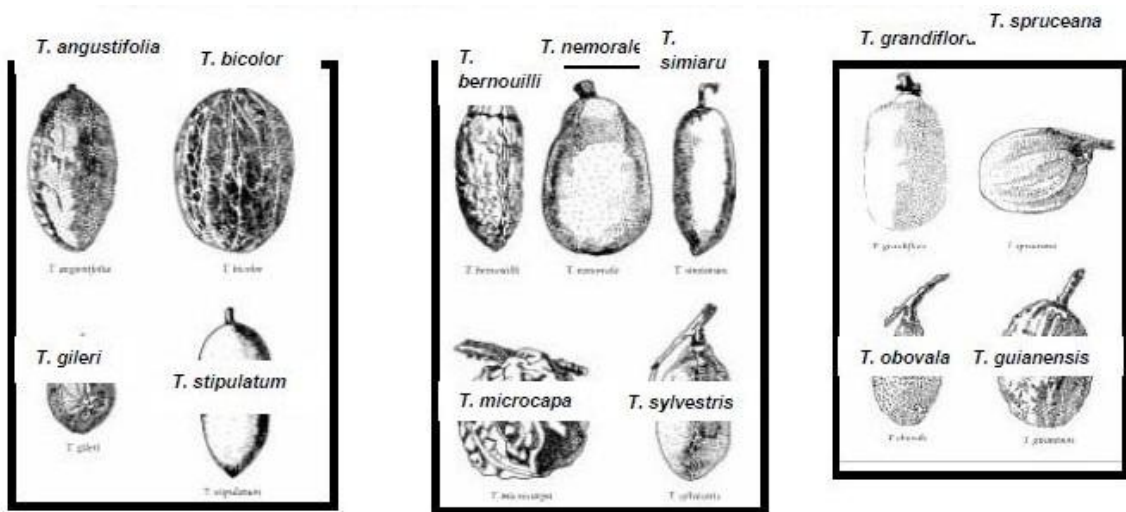


Figura 1. 1: Varios tipos de cacao de la especie Theobroma (Miranda, 2011)

2.1.2 Descripción del proceso de secado

El secado es un procedimiento de conservación que al disminuir la cantidad de agua contenida en un alimento, disminuye la actividad microbiana y reduce la actividad enzimática.

El agua se elimina de los alimentos por medio de su difusión, en fase líquida y/o vapor, a través de su estructura interior. Al movimiento del agua líquida le seguirá su evaporación en algún punto del alimento, para lo cual es necesario calor, por lo tanto el proceso supone realmente un transporte simultáneo de materia y energía.

La transmisión de calor tiene lugar en el interior del alimento y está relacionado con el gradiente de temperatura existente entre su superficie y la correspondiente a la superficie del agua en el interior del alimento. Si se suministra al agua suficiente energía para su evaporación, el vapor producido se transportará desde la superficie de la capa húmeda en el interior del producto hacia la superficie de éste. El gradiente de presión existente entre la superficie del agua en el interior y en el aire exterior al alimento, es el que provoca la difusión del vapor de agua hacia la

superficie de éste. Por lo tanto, durante el secado se producen cuatro procesos de transporte, en la figura 1.2 podemos ver un esquema de los mismos. Luego de estos cuatro procesos es importante tomar en cuenta que el aire ha entregado energía al producto y ha retirado humedad del mismo, además ha perdido presión luego de pasar por el lecho compacto o bandeja de cacao.

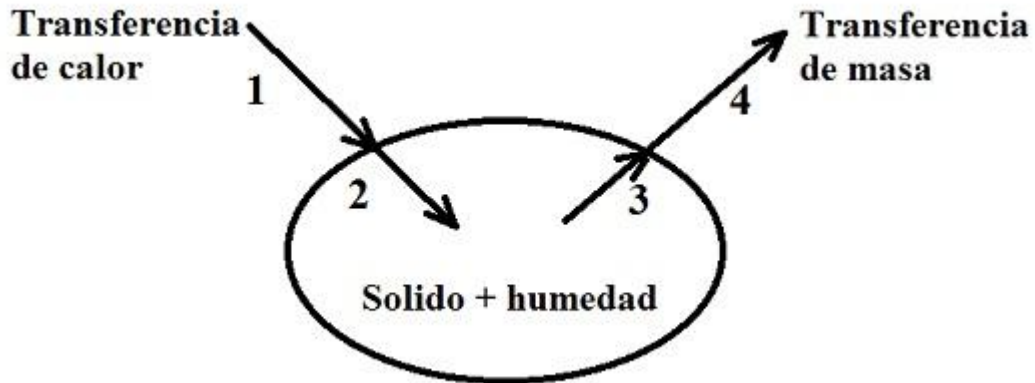


Figura 1. 2: Proceso básico de Secado

- 1.- Transmisión de calor desde el medio secante hasta la superficie del producto. Puede realizarse por conducción, convección o radiación.
- 2.- Transmisión de calor desde la interface sólido-medio secante hasta el interior del sólido. Sólo puede tener lugar por conducción, en régimen no estacionario (las condiciones en cualquier punto varían con el tiempo)
- 3.- Transmisión de materia a través del sólido. Se puede producir por difusión o por capilaridad. Difusión debida a las diferencias de concentraciones y capilaridad, aprovechando los capilares existentes. La difusión tiene lugar en el secado de productos con humedades del orden de 25% (base húmeda) o inferiores, mientras que la capilaridad se presenta para niveles más altos de humedad (65% o más), siempre y cuando en la estructura interna del producto existan capilares.

4.- Transferencia de vapor desde la interface sólido-medio de secado hacia el seno del medio secante. Los equipos de deshidratación utilizarán por tanto para la transferencia de energía, procesos basados en la convección, conducción o radiación desde la fuente de calor hasta el alimento. Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y aire como vehículo de esta energía, por lo tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión.

Es necesario tener en cuenta los cuatro procesos de transporte citados, puesto que la velocidad de secado será proporcional al más lento de ellos. En la mayoría de los casos los procesos limitantes serán los de transporte de materia y calor en el interior del alimento. (Texeira, 2004)

2.1.2.1 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO

El control del equipo de bandejas y compartimientos se mantiene por lo común regulando la temperatura y velocidad del aire circulante (así como la humedad), y rara vez a través de la temperatura de sólidos. Por lo tanto, las principales variables son:

Temperatura del aire (T): el comportamiento de un sólido secado a distintas temperaturas se encuentra representado por la figura 1.3 donde se puede apreciar que a mayor temperatura del aire (manteniendo constante el resto de las variables) mayor será la velocidad de secado, y las curvas presentarán mayor pendiente.

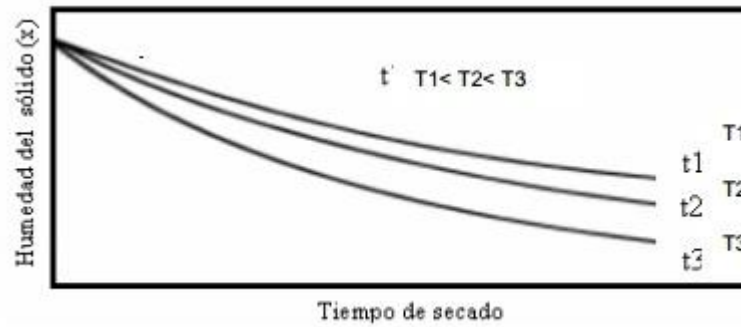


Figura 1. 3: Comportamiento del secado de un solido (Miranda, 2011)

Velocidad másica del aire (G): típicamente se presenta el efecto de esta variable operacional según la figura 1.4 , donde se observa cómo al aumentar la velocidad del aire también lo hace la velocidad de secado.

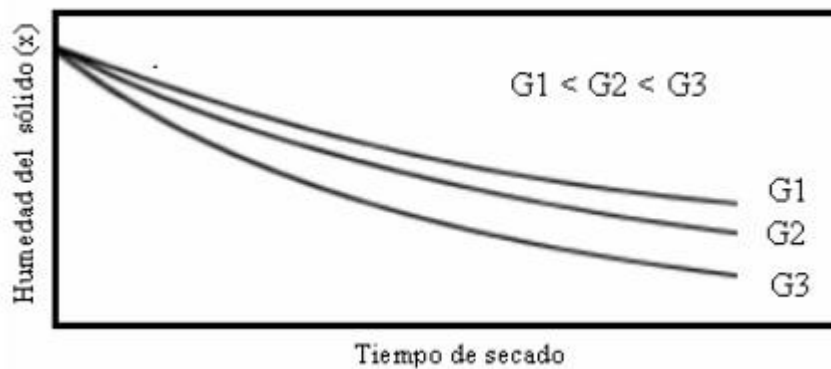


Figura 1. 4: Variación de la humedad del solido en el tiempo, a distintas velocidades másicas de aire (Miranda, 2011)

Humedad absoluta del aire (Y): al aumentar la humedad absoluta del aire disminuye lógicamente la velocidad de secado, disminuyendo la fuerza impulsora o motriz de la transferencia de masa en la fase gas, como se muestra en la figura 1.5. (Miranda, 2011)

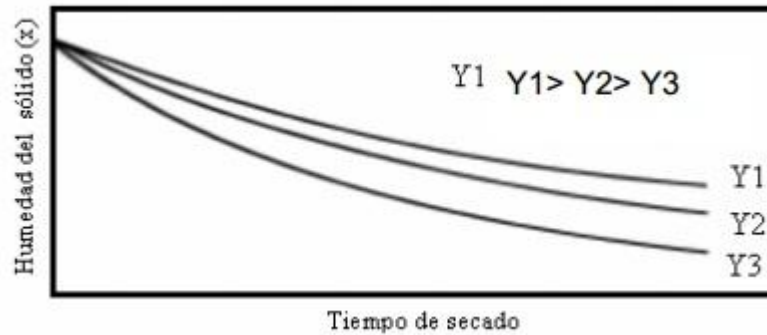


Figura 1. 5: Variación de la humedad del sólido en el tiempo a distintas humedades del aire (Miranda, 2011)

2.1.2.2 REQUERIMIENTOS DEL SECADO

Antes que nada el primer requerimiento a satisfacer o fijar en el secado de un producto agrícola es el mínimo de humedad y el máximo de humedad posible, para el caso del cacao al finalizar el proceso de fermentación se tiene una humedad promedio de casi 60% esta humedad debe reducirse a menos de un 8% ya que por encima de esta humedad la cosecha corre peligro ante la proliferación de moho durante el almacenado y tampoco debe reducirse por debajo del 6% por que la cascara del producto se vuelve quebradiza. Durante el secado ocurren las reacciones de oxidación que disminuye la amargura y la astringencia de los polifenoles, la temperatura optima para estas reacciones es de 35 °C ha temperaturas mayores de 65 °C existe inhibición, cuando se seca el cacao al sol se obtienen temperaturas máximas de 50 °C esto no distorsiona la actividad enzimática, pero en el caso de maquinas secadoras que puedan llegar a temperaturas mayores y hay que tener la precaución de operar por debajo de esa temperatura. (Vivas, 2011)

2.2 TIPOS DE SECADO

Es importante hacer una primera diferenciación de los métodos por los cuales se puede secar el producto agrícola estos métodos son.

2.2.1 SECADO NATURAL

La utilización del calor radiante del sol para evaporar la humedad de los alimentos es el método de secado más antiguo y extendido por todo el mundo, en la figura 1.6 se aprecia su simpleza. Sin embargo, el secado al aire presenta muchas limitaciones para producciones a gran escala, entre estas se pueden citar los elevados costos de mano de obra, la necesidad de grandes superficies, ausencia de posibilidades de control del proceso de secado, infestación por insectos, posible degradación de los alimentos debida a reacciones bioquímicas y desarrollo de microorganismos, debido entre otras cosas a los largos tiempos de secado, el hecho que solo parte de la energía irradiada al producto es absorbida. Entre las ventajas de la energía solar la más importante es que se trata de una energía libre, no contaminante, renovable y abundante que no puede ser monopolizada y satisface los requerimientos globales para el desarrollo sostenible. Por esta razón en los últimos años se han realizado numerosos intentos para desarrollar el secado solar principalmente para la conservación de productos agrícolas y forestales. El método tradicional de secado al sol consiste en distribuir el producto en una capa fina sobre una superficie uniforme. El producto se remueve y voltea periódicamente durante el secado. La temperatura del producto durante el secado al sol oscila entre 5 y 15°C por encima de la temperatura ambiente y el tiempo de secado puede alcanzar de una a dos semanas. Las características del producto: color, forma y las condiciones de humedad iniciales y finales deseadas influyen sobre la temperatura del producto y el tiempo de secado. El secado al sol es ampliamente utilizado para el secado de granos, también de frutas y algunas hortalizas. (Visalve, 2012)



Figura 1. 6: Patios de secado natural

2.2.2 SECADO ARTIFICIAL

Cuando las condiciones climáticas no son favorables al secado solar o cuando el tamaño de la plantación es tal que se hace necesario superficies considerables en el secado natural o también cuando deseamos recortar gastos de personal a cargo de cuidar la cosecha de animales e insectos o cambios climáticos, deben ser considerados métodos artificiales, más rápidos, en los cuales se utiliza el mismo principio de evaporación de la humedad por convección de un medio fluido a mayor temperatura, este es el principio de funcionamiento de los secadores, en la figura 1.7 vemos un secador de bandeja típico, de esta forma la fuente de calor puede ser variada, como por ejemplo resistencias eléctricas para pequeñas aplicaciones domésticas o el uso de colectores solares para casos de mayor envergadura, menor impacto ambiental y menores costos de operación, así tenemos una cantidad importante de características que se pueden combinar por eso es necesario catalogar las características más importantes y mencionar su naturaleza para poder hacer un buen diseño o selección para un problema de secado dado. (Visalve, 2012)



Figura 1. 7: Secador solar artificial (Bérriz, 1999)

2.2.3 CLASIFICACIÓN DE SECADORES

Los secadores pueden ser clasificados de varias maneras. Los dos criterios de clasificación más convenientes están basados en:

2.2.3.1 SEGÚN EL MÉTODO DE TRABAJO

Secadores pasivos: en un secador pasivo el aire es calentado y circulado naturalmente por las fuerzas de flotación o gradiente de densidades en el fluido en combinación con el gradiente de presión del viento. La mayoría de los secadores pasivos son secadores verticales, y son muy comunes en las regiones tropicales y subtropicales especialmente en África y Asia o en pequeñas comunidades agricultoras, estos secadores son primitivos, económicos ya que pueden ser contruidos con cualquier material disponible, fáciles de instalar y operar especialmente en lugares alejados de líneas eléctricas, estos secadores son los más

adecuados para secar pequeños lotes de frutas y vegetales como cambur, piña, mango, papa, zanahorias, etc.

Secadores activos: los secadores activos son diseñados incorporando potencia externa, como ventiladores, para el movimiento de la energía solar en forma de aire calentado desde el área del colector hasta la cámara de secado, así todos los secadores activos son, por sus aplicaciones, secadores de convección forzada. Un típico secador solar activo utiliza la energía solar solo como fuente de calor, mientras que para la circulación del aire usa alabes motorizados o ventiladores. Estos secadores encuentran mayor campo de aplicación en operaciones de secado comercial en combinación con motores de combustibles fósiles para tener un mejor control sobre el secado al aumentar el flujo de aire caliente. Los secadores activos son conocidos como lo más convenientes para secar productos alimenticios de alto contenido de humedad como la lechosa, kiwi, berenjenas, repollo, coliflor, etc. (Visalve, 2012)

2.2.3.2 SEGÚN EL MÉTODO DE CALENTAMIENTO DEL MEDIO

Secador Directo: el método de funcionamiento del secador directo es mostrado en la figura 1.8, también conocido como secador solar de gabinete. En este tipo de secador la humedad es extraída del producto por el aire entrante al secador desde abajo y es expulsada por la parte superior a través de la salida como se muestra en la figura. En el secador de gabinete, del total de la radiación solar que incide en el vidrio cobertor, una parte es reflejada de regreso a la atmosfera y el resto es transmitido al interior de la cámara, además de eso, una parte de la radiación transmitida es entonces reflejada por la superficie del producto y el resto absorbido por el mismo lo cual causa que su temperatura aumente y así emita radiación de onda larga que no puede escapar a la atmosfera gracias al vidrio cobertor. Este fenómeno causa que la temperatura alrededor del producto dentro del secador aumente. El vidrio

cobertor entonces tiene un importante rol en el aumento de la temperatura del aire dentro del secador el cual se encarga del secado propiamente dicho.

Las ventajas del secador directo son:

- Simples y más económicos para construir que el secador indirecto para la misma carga de producto.
- Ofrece protección de lluvias, rocío, suciedad, etc.

Las desventajas del secador directo son:

- Produce sobrecalentamiento y daño localizado en el cultivo
- En comparación con otros secadores los secadores directos tienen un bajo nivel de remoción de vapor del producto.
- Están limitados a aplicaciones de pequeña escala.
- Permiten la decoloración del cultivo por la exposición directa de la radiación solar

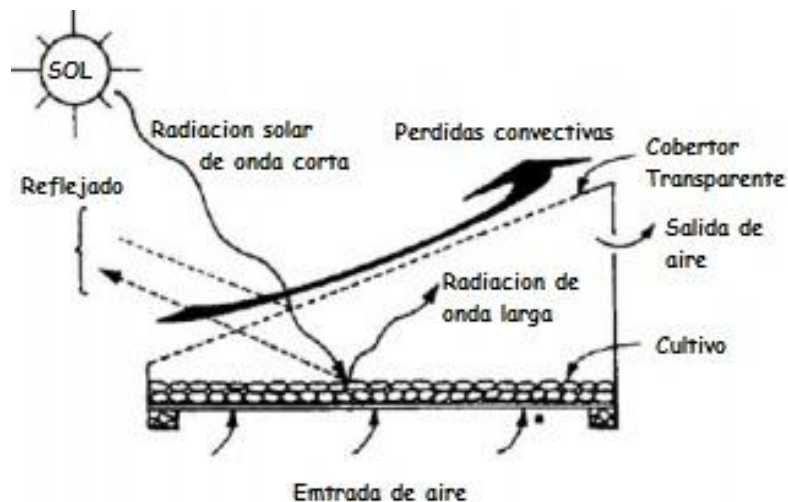


Figura 1. 8: Principio de funcionamiento de un secador directo

Secador indirecto: este secador difiere del secador directo respecto a la remoción del vapor, la figura 1.9 describe el principio de funcionamiento del secador

solar indirecto. El cultivo en el secador indirecto está localizado en bandejas o una especie de estantería dentro de una cámara de secado opaca separada de una unidad llamada colector solar, la cual es usada para calentar el aire entrante al secador, al aire caliente se le permite fluir a través del cultivo húmedo el cual lo provee de calor para la evaporación de la humedad excesiva mediante transferencia de calor convectiva entre el aire caliente y el producto. El secado tiene lugar de la diferencia de concentración de humedad entre el aire caliente y el aire próximo a la superficie del producto.

Las ventajas de los secadores indirectos son:

- Ofrece mejor control sobre el secado y el producto obtenido es de mejor calidad que al usar secadores directos.
- Caramelización y daño localizado por calor no ocurre en el cultivo gracias a la cámara que lo protege de la radiación directa.
- Puede ser operado a mayores temperaturas
- Altamente recomendados para cultivos foto-sensitivos.
- Posee una tendencia inherente a una mejor eficiencia que el secador directo.

La única desventaja que tiene es que requiere de una estructura más elaborada, mayor inversión en investigación y equipos y mayores costos de mantenimiento que los secadores directos.

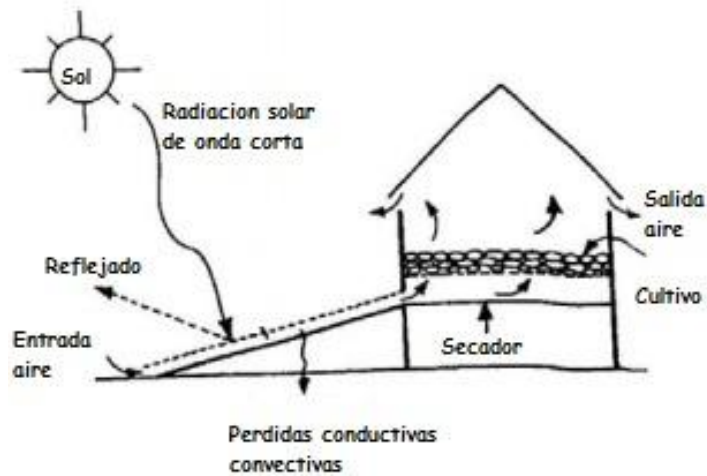


Figura 1. 9: Principio de Funcionamiento de un secador indirecto

Secador Mixto: el secador solar mixto combina las características de un secador directo y un secador indirecto, estos secadores combinan la incidencia directa de la radiación solar sobre el producto a secar y un precalentador de aire o un colector solar que calentara el aire entrante, juntos proveen del calor necesario para el proceso de secado. La figura 1.10 muestra el principio de funcionamiento del secador mixto. (Visalve, 2012)

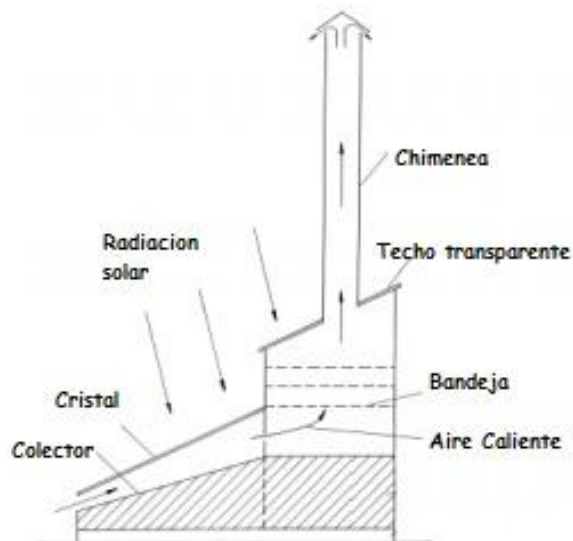


Figura 1. 10: Principio de funcionamiento de un secador mixto

Pueden entonces existir combinaciones de ambos criterios para catalogar un mismo secador como lo vemos en la figura 1.11

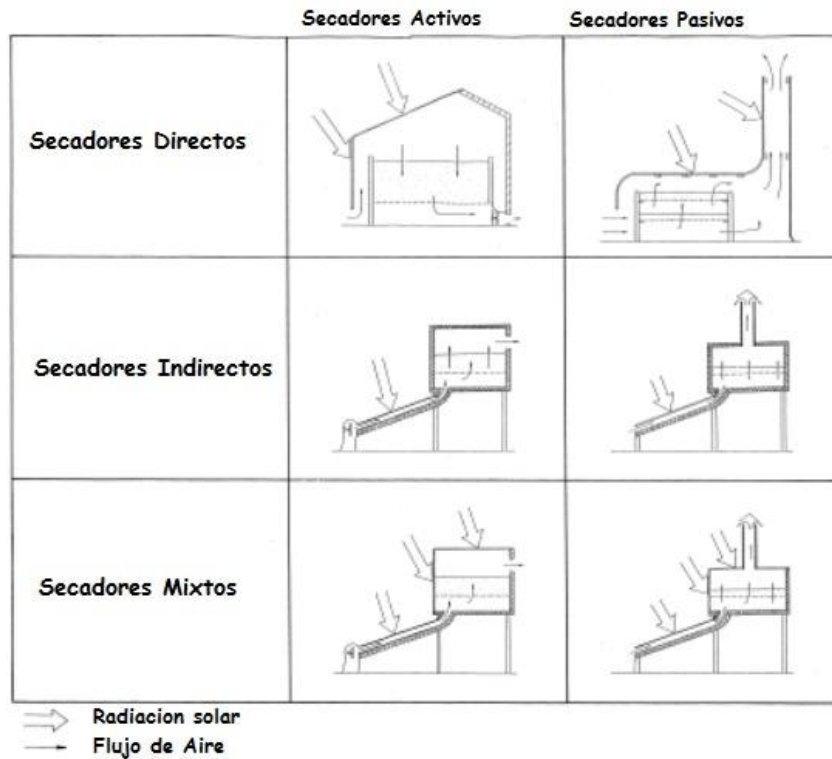


Figura 1. 11: Típicos diseños de secadores solares

2.3 SECADOR DE BANDEJAS

En el secador de bandejas, que también se llama secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimientos, el cultivo a secar, que puede ser un sólido en forma de terrones, granular o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja, con un fondo poroso que permita el paso del aire caliente, de 10 a 100 mm de profundidad que permita un secado uniforme del producto.

Un secador de bandejas típico se muestra en la figura 1.12, tiene bandejas que se cargan y se descargan en un gabinete. Un ventilador, opcional dependiendo del

diseño y aplicación, hace circular el aire, calentado por el colector solar, a través de la superficie porosa de las bandejas y atravesando el producto que se desea secar. También se podría usar calor eléctrico para calentar el aire, en especial cuando el calentamiento por radiación solar es más bajo. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado.

Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas introducidas al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador.

En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire, según Visalve, 2012.

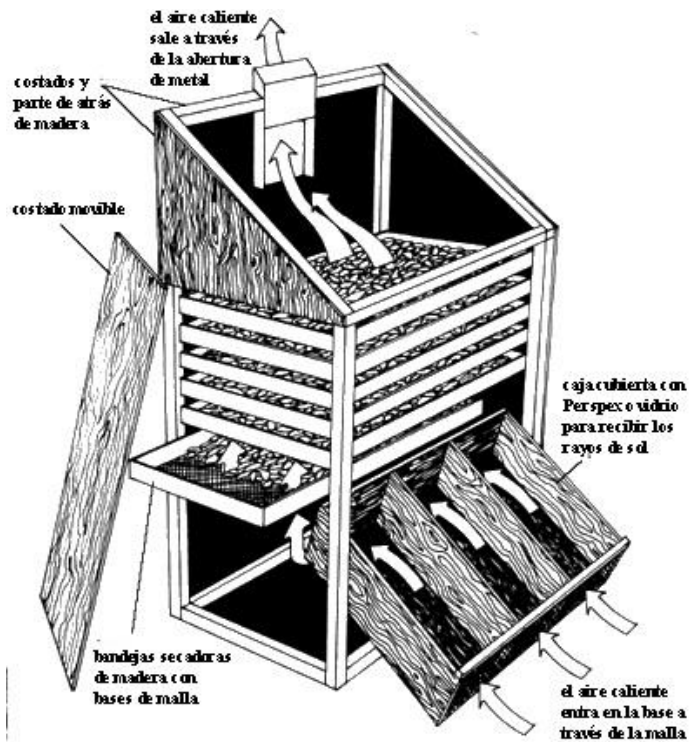


Figura 1. 12: Secador solar de bandejas

2.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En la figura 1.12 podemos apreciar un secador solar de bandejas, está compuesto por un colector solar, esta unidad es la encargada de absorber la radiación solar, comúnmente tiene forma de paralelepípedo en color negro mate, para actuar como objeto negro y así aumentar la absorción de la radiación del sol, este paralelepípedo tiene una cara de vidrio, la que da hacia el sol, que permite que la radiación penetre al interior del colector y además evita la salida del calor y produce un efecto de invernadero y así se consigue calentar el aire entrante además el colector sirve para dirigir el aire a la cámara de secado.

La cámara de secado es un elemento normalmente vertical también en forma de paralelepípedo que no permite la entrada de radiación solar, en el cual se acomodan

las bandejas, con el producto a secar, una por encima de otra con cierta distancia entre estas, el aire calentado en el colector entra en la cámara de secado desde abajo y por debajo de todas las bandejas, circula a través del producto, lo seca, y sale por la parte superior por algún escape o chimenea.

2.3.2 CAÍDA DE PRESIÓN

En el secador solar de bandejas como en cualquier otra máquina que trabaje con fluidos hay que tomar en cuenta que a medida que el flujo pasa por la máquina este reduce su energía, en este caso se reduce la presión del fluido, es posible identificar las causas de esta reducción de energía y los puntos donde se concentran estas pérdidas, si hacemos una analogía del sistema del secador solar con una tubería por la cual pasa un fluido interno, tenemos que, las pérdidas se dividen en dos categorías: a) aquellas provocadas por el esfuerzo cortante en la pared de los elementos de tubería, y b) las provocadas por componentes de tuberías; las primeras se distribuyen a lo largo de los elementos de tubería, las segundas se tratan como discontinuidades discretas en la línea piezométrica y en la línea de energía y comúnmente se conocen como pérdidas menores y se deben principalmente a flujos separados o secundarios. (Potter, 2002)

2.3.2.1 PERDIDAS MENORES

Los elementos de tubería que incluyen codos, ensanchamientos, contracciones, entradas, salidas, curvas y otras piezas de conexión, provocan pérdidas adicionales conocidas como *pérdidas menores*, aun cuando tales pérdidas pueden exceder las pérdidas por fricción. Cada uno de los dispositivos cambia la magnitud o dirección o ambas de los vectores de velocidad y el resultado por consiguiente es una pérdida. (Potter, 2002)

2.3.2.2 PERDIDAS POR FRICCIÓN

Sin duda la magnitud mas calculada en el diseño de elementos con flujos internos desarrollados son las perdidas por fricción, En el secador solar tenemos dos tipos de perdidas por fricción, obviamente de la misma naturaleza pero que responden a distintos modelos.

En primer lugar tenemos las pérdidas de carga hidrostática que no es otra que la producida por el esfuerzo cortante que ejerce la superficie de los elementos sobre el fluido y el cual puede caracterizarse por varias cantidades que afectan el flujo, tales como la densidad, la velocidad, el diámetro o radio hidráulico y la aspereza de la pared.

Por otra parte tenemos las pérdidas generadas por el flujo del fluido a través de la capa o cama de cacao que se encuentra en las bandejas, y donde se genera todo el cambio energético y de masa, es el proceso más importante del secado y donde se generan las mayores cantidades de perdidas, en comparación con las pérdidas de carga hidrostática ya que los tramos que recorre el fluido no son muy grandes, es fundamental que el fluido atraviese esta capa de cacao uniformemente, estas pérdidas responden al modelo de pérdidas de fluidos a través de lechos compactos. (Potter, 2002)

2.3.3 TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

El principio primero en el que se basa la tecnología de secadores es en el intercambio de calor y masa entre un medio caliente y con poca humedad y un sólido frio con humedad excesiva, primero que nada se toma como fuente de energía térmica al sol y usando y concentrando la radiación que emite se calienta el aire y se dirige a la cámara de secado, es importante notar que el aire solo funciona como medio para transportar energía y una vez dentro de la cámara de secado su misión es transferir

toda esa energía al producto a secar, pero en la práctica una vez el aire caliente ha entrado a la cámara de secado empieza a sufrir pérdidas térmicas a través de las paredes de la misma por lo que utilizar aislantes conduce a una mayor potencia en el sistema, por otro lado la transferencia de calor con ella superficie del producto a secar es el objetivo primordial y debe hacerse lo más uniforme posible para aprovechar al máximo el calor del aire.

El calor entre la superficie del producto y su interior es el que propicia la evaporación de la humedad excesiva del cultivo, esta evaporación será más rápida en la medida de que el gradiente de temperaturas en el producto sea mayor, el vapor que es retirado es tomado por el aire que ahora está más frío y expulsado del sistema a través de la chimenea, es importante notar que entre más frío y húmedo esté el aire menos será su capacidad de secado. (Visalve, 2012)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el capítulo 1 se conocieron los objetivos de este trabajo, en el capítulo 2 se dio a conocer el fundamento teórico tecnológico en el cual se basa el presente proyecto, en éste capítulo se desglosarán detalladamente los pasos y etapas que se siguió para obtener los resultados finales. En esta parte del proyecto, el tipo del secador, las dimensiones de la cámara y la carga de cacao a deshidratar fueron decididas en una etapa anterior que consistió en el diseño del prototipo, trabajo realizado por Carvallo D y Meza Carolina, 2012. Una vez definida la configuración del prototipo base, se utilizó el programa ANSYS CFX 10 con el fin de observar el comportamiento fluidodinámico y la distribución de las temperaturas del flujo de trabajo dentro de la cámara, además, para identificar zonas de turbulencia y pérdidas concentradas y evaluar diferentes geometrías que las reduzcan.

En el siguiente diagrama de flujo (figura 4.1) se observa una serie de etapas que debieron ser llevadas a cabo para poder obtener los resultados y luego hacer el análisis pertinente en función obtener mejoras en el proyecto.

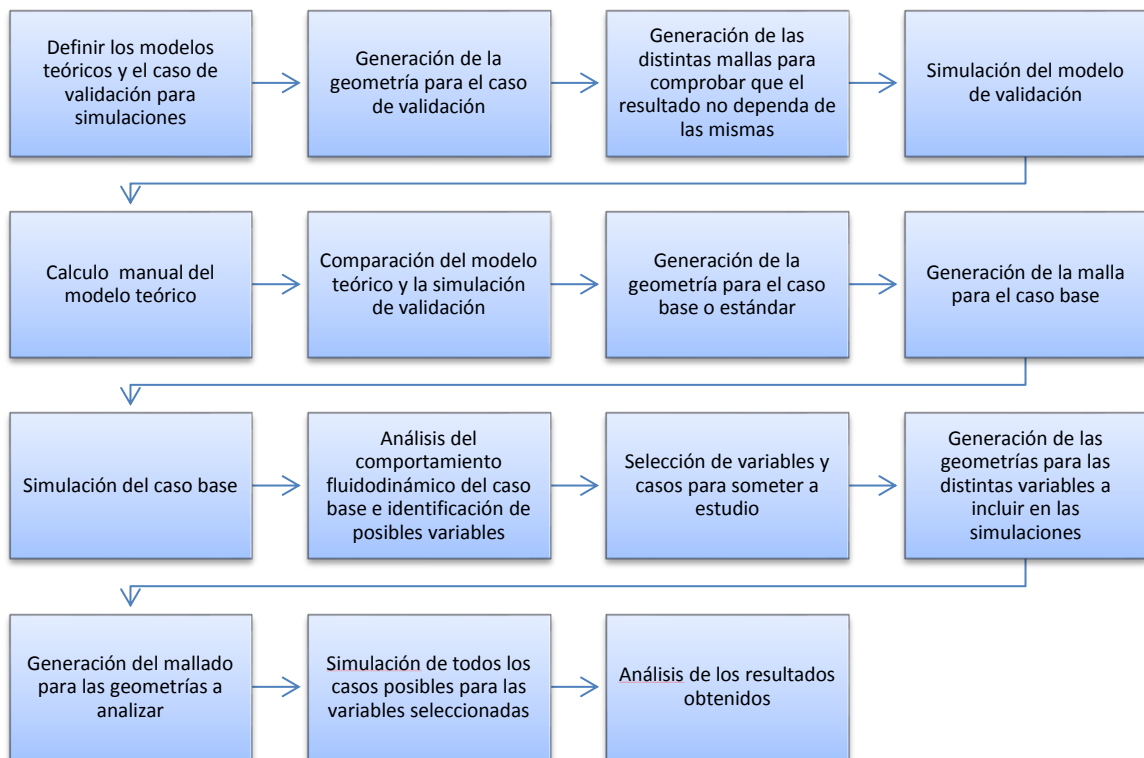


Figura 4. 1: Diagrama de flujo de la metodología

3.1 MODELO MATEMÁTICO

Es importante conocer que las simulaciones que se llevan a cabo en este proyecto son utilizando el software ANSYS CFX 10. Este programa utiliza métodos numéricos para resolver modelos matemáticos integrados, estos son la ecuación de energía, la ecuación de momentum y la ecuación de continuidad, siendo estas ecuaciones las que modelan el comportamiento térmico y fluidodinámico dentro de la cámara de secado. En las regiones correspondientes a la bandeja se agregó un término fuente en la ecuación de momentum, para modelar la reducción de temperatura por la transferencia de calor hacia el cacao, además, en la ecuación de energía al término correspondiente a las pérdidas se le asignó el modelo de fluido a través de lechos rellenos (Ec. 4.8). Así podemos modelar y analizar virtualmente prototipos o sistemas antes de construirlos pudiendo ahorrarnos tiempo y dinero al identificar errores o defectos en el diseño. Para nuestro caso el análisis es en régimen permanente entonces las ecuaciones a resolver serán.

- *Ecuación de Continuidad:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (\text{Ec.4.1})$$

Como se trata de un caso de flujo incompresible y régimen permanente, la densidad permanece constante y el primer término se anula.

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

- *Ecuaciones de momentum:*

$$\nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot \left(-\rho \delta + \mu (\nabla U + (\nabla U)^T) \right) + S_M \quad (\text{Ec.4.3})$$

- *Ecuación de la Energía:*

$$\nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (\text{Ec.4.4})$$

Donde h_{tot} se define como entalpia especifica total, que para el caso de propiedades variables y flujo compresible está dado en términos de la entalpía estática especifica, h (termodinámica), por:

$$\mathbf{h_{tot} = h_{est} + \frac{1}{2}U^2} \quad \text{(Ec. 4.5)}$$

Donde,

$$\mathbf{h = h(T)} \quad \text{(Ec. 4.6)}$$

Viene dada por la ecuación de estado de la sustancia.

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DOMINIO DE SOLUCIÓN

El dominio de la solución se compone y define por un volumen geométrico el cual sirve para definir el rango espacial donde es pertinente hacer los cálculos de los modelos por volumen finito y además se deben definir varias propiedades del fluido para caracterizar cada problema. Los diseños de las cámaras de secado que se realizaron, se basan en varias partes geométricas que la conforman, estas son la parte inferior (conformada por la entrada y el tramo de cámara hasta la primera bandeja), cinco bandejas de 3 cm de altura, parte intermedia entre bandejas de 10 cm entre una y otra y parte superior (conformada por el tramo de cámara desde la ultima bandeja hasta la salida) para todas estas piezas 0.9 m de ancho y 0.7 m de profundidad, y las características atribuidas al fluido de trabajo fueron, para el tipo de fluido se escogió aire como gas ideal, a una presión de referencia de 1 atm y un modelo de turbulencia *k-epsilon* y modelo de transferencia de calor *Energía Térmica*.

Existe una particularidad en las bandejas que obligan a definir su dominio con características adicionales, ya que en las bandejas estarán las semillas de cacao formando una capa por donde el aire tendrá que fluir, para efectos de la simulación se considera el volumen de las bandejas como un medio poroso el cual responde al caso de un lecho compacto, entonces aparte de las características mencionadas anteriormente para caracterizar el dominio solución de las partes de la cámara de

secado, para las bandejas se define un subdominio el cual se configuró para medio poroso, de esta forma se simula el comportamiento del aire a través de la cama de cacao.

Además para cada dominio en específico se realizaron varias mallas, permitiendo así corroborar, que los valores obtenidos son independientes de las mismas, es decir, que la variación de los resultados es despreciable al cambiar la malla a una malla mas fina o con mas cantidad de elementos, esto nos asegura los resultados mas precisos posibles con la menor cantidad de tiempo invertido en el calculo computacional. Luego de esto, se empleó una función propia del programa que permite que el tamaño de la misma vaya variando poco a poco longitudinalmente haciéndola mas fina en los puntos de interés y mas gruesa en zonas de poco interés, llamado radio de influencia, con un mínimo de longitud de triángulos de 0,5 mm y un máximo de 20 mm, garantizando un tamaño adecuado del mallado en todo el dominio solución.

En la figura 4.2 se observa la generación de la geometría mediante el programa *Autodesk Inventor 2012*

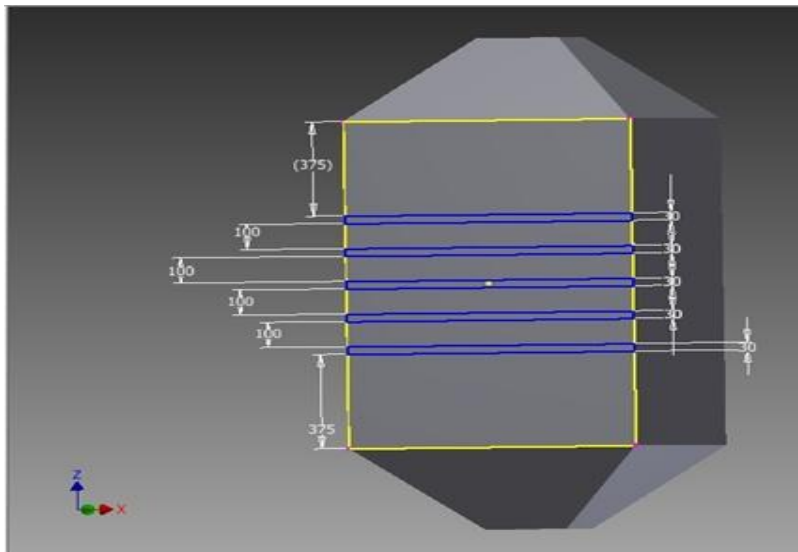


Figura 4. 2: Dominio general de la geometría, donde se remarcan las bandejas con el color azul, con sus dimensiones correspondientes

3.1.2 ECUACIONES DE CONTINUIDAD, DE MOMENTUM Y DE ENERGÍA

3.1.2.1 MODELO DE CAÍDA DE PRESIÓN EN LAS BANDEJAS

Este modelo es de alta importancia ya que permite predecir la caída de presión en las bandejas que conforman el arreglo de la cámara de secado, de manera que una vez obtenido el resultado, permita calcular la potencia mínima necesaria para colocar un ventilador que sea capaz de hacer circular el aire que proviene del colector solar, y hacer que este pueda atravesar el mismo y la cámara de secado proveyendo del flujo másico deseado.

En el programa se utiliza un modelo de medio poroso en las bandejas, el cual simula la cama de cacao, con un modelo isotrópico basado en (Levenspiel, 2004), Representado de la siguiente manera:

$$\frac{g}{g_c} \Delta z + \Delta \left(\frac{U^2}{2g_c} \right) + \int \frac{1}{\rho} dp + W_s + h_f = 0 \quad (\text{Ec.4.7})$$

$$\sum F = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu v_0 l}{g_c \varepsilon^3 D p^2 \rho} + \frac{1.75(1-\varepsilon) v_0^2 l}{g_c \varepsilon^3 D p} \quad (\text{Ec.4.8})$$

Luego de hacer las consideraciones pertinentes nos queda

Una vez definido el modelo teórico, fue necesario introducirlo en el programa para que éste tome en cuenta el comportamiento adecuado del caso estudiado, por lo cual, se programó específicamente para el subdominio de las bandejas, que corresponden al modelo de lechos rellenos, la siguiente ecuación:

$$S_M = -\frac{\mu}{K_{perm}} U_i - K_{perd} \frac{\rho}{2} |U| U_i \quad (\text{Ec.4.9})$$

Una vez obtenido el modelo para la simulación, es necesario hacer una equivalencia entre éste y el modelo teórico, al comparar las ecuaciones 4.8 y 4.9 se concluye que las expresiones apropiadas para K_{perd} y K_{perm} vienen dadas por:

$$K_{perm} = \frac{g_c \epsilon^3 D_p^2 \rho}{150(1-\epsilon)^2} \quad (\text{Ec.4.10})$$

$$K_{perd} = \frac{3.5(1-\epsilon)UL}{\rho^2 \epsilon^3 d_p} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Donde;

$$Deq = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} \gamma \quad (\text{Ec. 4.12})$$

$$V = \frac{m_c}{\rho_c} \quad (\text{Ec.4.13})$$

$$D_p = \phi Deq \quad (\text{Ec.4.14})$$

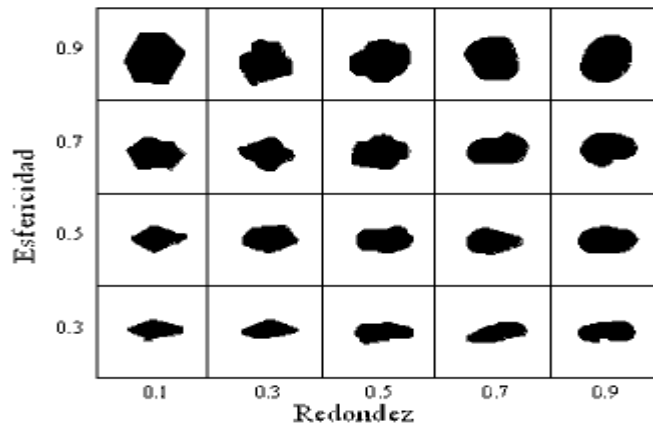


Figura 4. 3: Tabla para determinar la esfericidad y redondez de una partícula. (Santamarina, 2004).

Donde, para la esfericidad, se asumió un valor de redondez de 0.5, una vez asignado dicho valor, se tomó un valor de esfericidad que concordara con la similitud de la semilla de cacao, obteniéndose así un valor de esfericidad de 0.5.

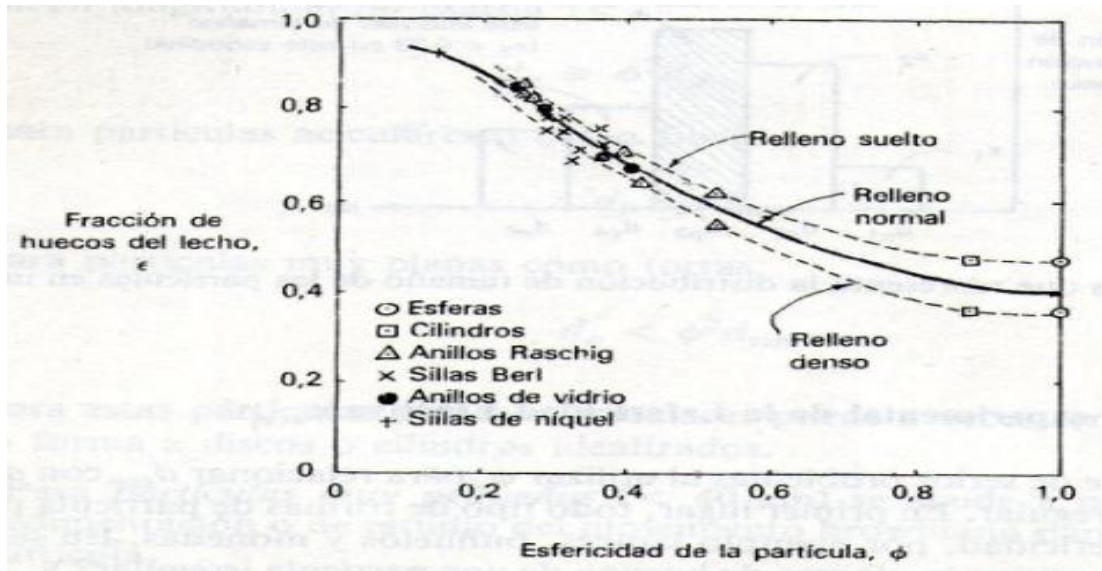


Figura 4. 4: Gráfico para determinar la fracción de huecos del lecho, en función de la esfericidad de la partícula ϕ (Levenspiel, 2004)

De la gráfica 4.4, una vez tomado un valor de esfericidad de la partícula 0.5 se pudo obtener un valor de fracción de huecos del lecho aproximado de 0.6, tomando el cacao como relleno denso.

En la siguiente figura se evidencia la caída de presión en una bandeja para el modelo de validación, el cual fue simulado mediante los siguientes datos dentro del programa:

Velocidad del aire de entrada $1 \frac{m}{s}$, densidad del cacao de $900 \frac{kg}{m^3}$, 0.5 m de largo, 0.03 m de alto y 1.76 m de profundidad.

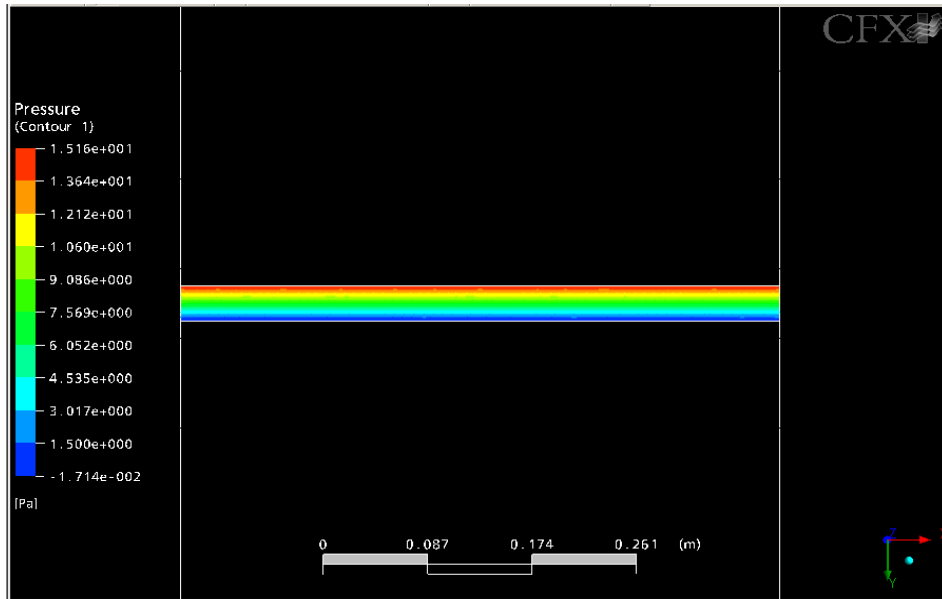


Figura 4. 5: Caída de presión en la bandeja número uno

3.1.2.2 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El modelo de transferencia de calor a aplicar será de alta importancia ya que gracias al mismo se permitirá ver el gradiente de temperatura a lo largo de la cámara, para ser más específicos en las bandejas, ya que en esta geometría se centrará el caso de estudio. Este modelo permitirá observar una vez realizada la simulación si la temperatura no excede la permisible para que el producto final sea el deseado, en un estado optimo.

El estudio se basará en el modelo de transferencia de calor por convección, agregando un término adicional que corresponde al modelo desarrollado por Lopardo y Torres (2012). En este trabajo no se simuló la transferencia de masa, por lo cual fue necesario tomar el modelo mencionado anteriormente, para generar los valores de la humedad absoluta, a medida que el aire fluye a través de la cámara de secado.

$$S_E = \frac{h}{e} (T_p - T) + \frac{h_{fg} \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)}{e * A} \quad \text{(Ec. 4.15)}$$

Donde h_{fg} se evalúa a la temperatura del producto.

Donde el primer termino se refiere al calor sensible por unidad de volumen para calentar el grano de cacao y el segundo término corresponde al calor latente, el cual es el encargado de evaporar el agua del cacao.

Una vez definido el modelo teórico, fue necesario introducirlo en el programa para que éste tomara en cuenta el comportamiento adecuado del caso estudiado, por lo cual, se programó específicamente para el subdominio de las bandejas, (que corresponden al modelo de lechos rellenos) tomando en cuenta que el termino correspondiente al calor latente varía para cada bandeja, ya que la humedad es diferente en cada una de ellas, se obtuvieron las cinco ecuaciones presentadas a continuación, donde el segundo término después de la igualdad, se obtuvo del modelo desarrollado por Lopardo y Torres (2012) al introducir como datos de entrada temperatura 326 K, 60% humedad relativa del aire y un flujo másico de 0.375 m/s que corresponde a una velocidad de 1 m/s.

Para la bandeja 1:

$$S_{E1} = \frac{(h*(51.84-T))}{e} + 0.011 \quad \text{(Ec. 4.16)}$$

Para la bandeja 2:

$$S_{E2} = \frac{(h*(49.86-T))}{e} + 33.43 \quad \text{(Ec. 4.17)}$$

Para la bandeja 3:

$$S_{E3} = \frac{(h*(47.91-T))}{e} + 34.53 \quad \text{(Ec. 4.18)}$$

Para la bandeja 4:

$$S_{E4} = \frac{(h*(46.10-T))}{e} + 28.78 \quad \text{(Ec. 4.19)}$$

Para la bandeja 5:

$$S_{E5} = \frac{(h*(44.31-T))}{e} + 30.03 \quad \text{(Ec. 4.20)}$$

En las ecuaciones 4.15-4.20 la temperatura se expresa en °C y S_E se expresa en W/m^3

En la siguiente figura 4.6 se puede evidenciar, para un caso genérico, la distribución de temperatura y como al fluir el aire a través de la cámara, va perdiendo energía.

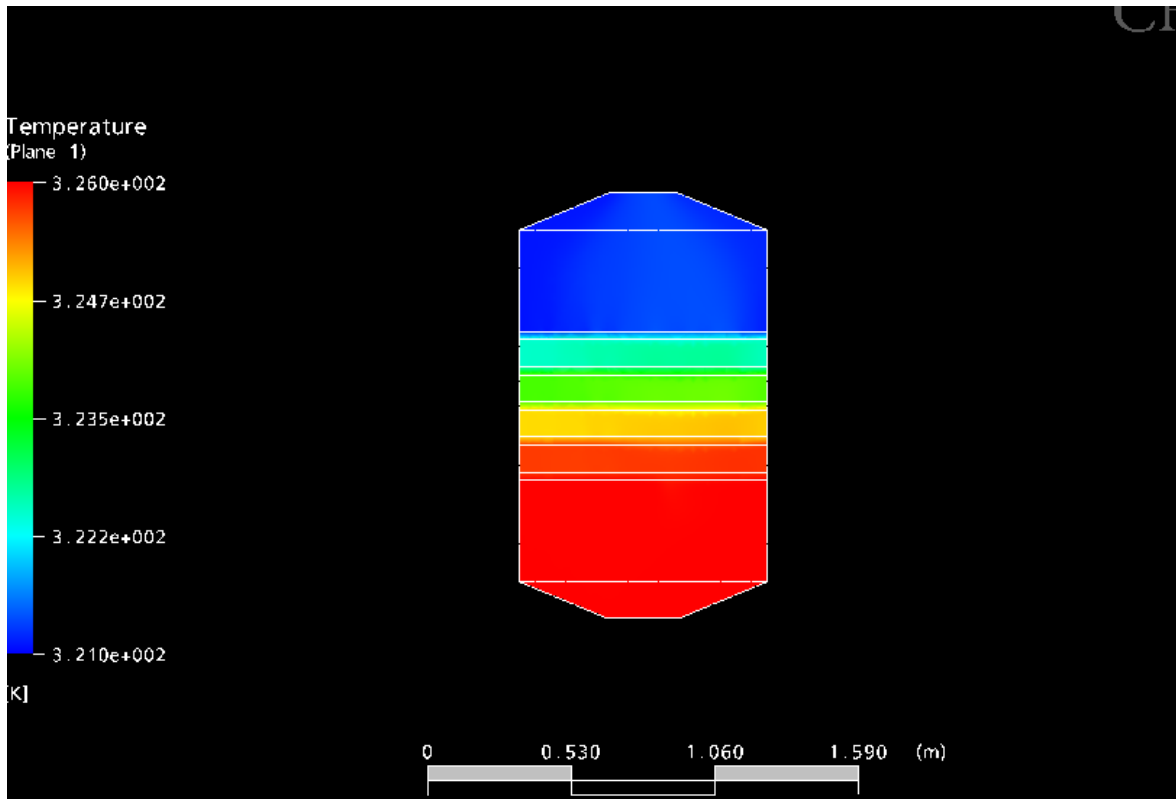


Figura 4. 6: Distribución de temperatura a lo largo de la cámara de secado.

3.1.3 CONDICIONES DE BORDE

Al simular, se resuelven ecuaciones generales para un problema dado, por lo que es necesario particularizar las simulaciones a través de las condiciones de borde, las cuales permiten ajustar el modelo a la realidad del caso que se vaya a estudiar.

Por cada dominio se utilizan dos condiciones de borde, para el caso de la parte inferior de la bandeja:

Entrada con una rapidez de 1 m/s y una dirección definida según el caso de estudio, flujo subsónico y un medio de turbulencia alto con un porcentaje de

intensidad del mismo de 10%, lo que significa una intensidad de turbulencia alta, ya que al calcular el número de Reynolds el resultado arrojó un valor elevado, y una temperatura estática de 326 K. Para la pared de la entrada se utilizará una condición de borde de pared, de no deslizamiento y adiabática ya que se da por sentado la colocación de aislantes en la pared para evitar pérdidas de transmisión de calor de la pared hacia el exterior.

Para el caso particular de las bandejas, se escogieron como condiciones de borde una condición inicial de pared, sin deslizamiento para las cuatro caras que aíslan el aire del exterior. Como segunda condición de borde se toma una interface que une las caras superior e inferior con los dominios que están colocados antes y después de esta, logrando que los cálculos numéricos que realiza el programa, mantengan coherencia al pasar de un dominio a otro.

En el espacio de intermedios entre bandejas se usará una condición de borde de pared adiabática sin deslizamiento y como una segunda condición de borde la interface entre las caras inferior-superior haciendo contacto con las bandejas. Estas interfaces se unen de manera que los algoritmos numéricos empleados, así como el tratamiento de superficie de control de los flujos numéricos a través de la interface, se han diseñado e implementado de tal manera que proporcione la máxima precisión. El tratamiento de los flujos de interfaz es totalmente implícito y totalmente conservador de la masa, momentum, la energía, los escalares, etc. Esto significa que el solucionador multimalla se puede aplicar directamente, sin ninguna penalización en términos de precisión o la tasa de convergencia.

Para la parte superior se aplicará una condición de borde correspondiente a la salida de la cámara, con una presión relativa de 0 Pa., régimen subsónico y la

condición de pared que se utilizará para este dominio sin deslizamiento y la opción de transferencia de calor será adiabática.

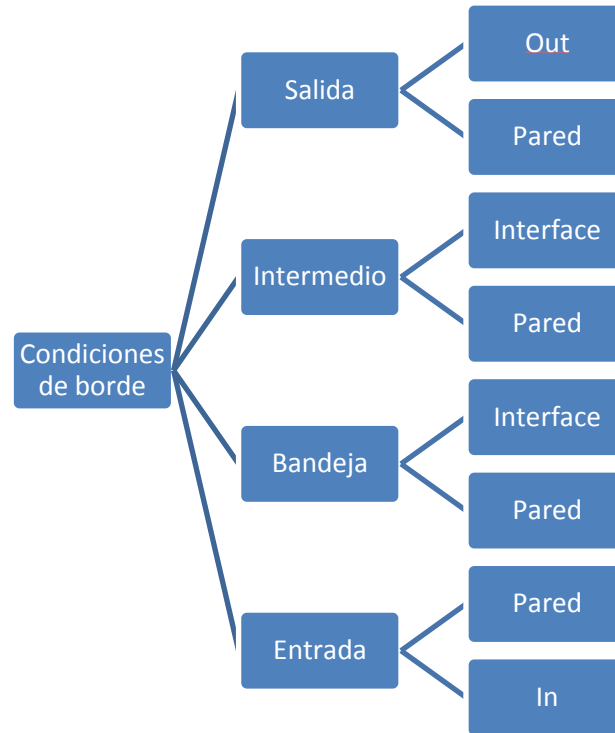


Figura 4. 7: Configuración de las condiciones de borde para todos los dominios utilizados en las simulaciones

3.2 MODELO DE VALIDACIÓN

Es importante destacar que el programa ANSYS CFX 10 trabaja resolviendo ecuaciones de manera numérica mediante el método de volúmenes finitos, por lo cual, es importante comprobar los resultados obtenidos mediante las simulaciones con un modelo calculado de manera teórica, de manera que se realizó un modelo de validación para comprobar la capacidad del CFX para reproducir la caída de presión en las bandejas empleando el modelo de medio poroso.

Para el modelo de validación se utilizó una geometría similar a la de una cámara de secado, con dimensiones de 0.5 x 0.5 x 1.86 m tanto como para la sección

inferior como la sección superior, para la única bandeja utilizada en el modelo se tomó una geometría de 0.5 x 0.3 x 1.86 m, tomando en cuenta que se diseñó específicamente para el caso donde la cama de cacao es delgada, de manera que se pudiera colocar de manera uniforme el mismo en su profundidad para un mejor aprovechamiento del aire y del secado.

La geometría del modelo se realizó en el programa Autodesk Inventor 2012, de manera que una vez terminada dicha geometría, sus archivos .igs se importaron al ANSYS WORKBENCH para hacer el mallado. Para el caso del mallado, se tomaron tres mallas con diferente número de elementos, de manera de lograr que los resultados fueran independientes de dicha malla, es decir que la variación de los resultados fuese despreciable al modificar dicho tamaño. El número de elementos en cada malla y la caída de presión obtenida en cada caso se muestran en la tabla 3.1. La mayor variación del tamaño de los elementos se concentró en la zona de la bandeja. Para el primer caso se tomó una malla fina en toda la geometría, el segundo caso una malla de menor tamaño que la primera y el caso final una malla muy fina en entrada-salida-bandeja y se pudo determinar que la variación de la malla arrojaba resultados más parecidos, pero mientras más pequeña el tamaño de la malla, se requería más tiempo de simulación.

Una vez realizada la adaptación de la malla, se procedió a generar la malla de superficie, donde se utilizaron herramientas propias del programa, como el radio de influencia para que el tamaño de los elementos en la malla variaran, haciéndola más fina en los puntos clave del cálculo.

Luego se procedió a generar la malla de volumen donde se generan los elementos que contendrá el archivo al cual se le asignarán las condiciones de borde, interfaces y caracterización de los dominios a los cuales corresponden dichos modelos.

En el modulo del programa ANSYS CFX PRE se asignaron los dominios con sus características adecuadas, condiciones de borde, interfaces que para este caso unieron los tres dominios que conformaban la configuración de la cámara. Entre los modelos matemáticos posibles para la asignación de la turbulencia, se utilizó el modelo más estándar, siendo este el k-epsilon, ampliamente utilizado y probado en la industria, aun así se realizó una simulación con otro modelo de turbulencia llamado Shear Stress Transport (SST) con el fin de poder hacer comparaciones con ambos modelos.

Como criterio de convergencia, se asignó un esquema de alta resolución (Ansys, 2006), para un máximo de 200 iteraciones y una tolerancia pre-establecida de 1×10^{-4} RMS

Tabla 3. 1: Comparación modelo teórico con modelo de validación

Presión Modelo Valid. Manual	Presión Modelo Valid. Simulación
16,97 Pa.	15,15 Pa

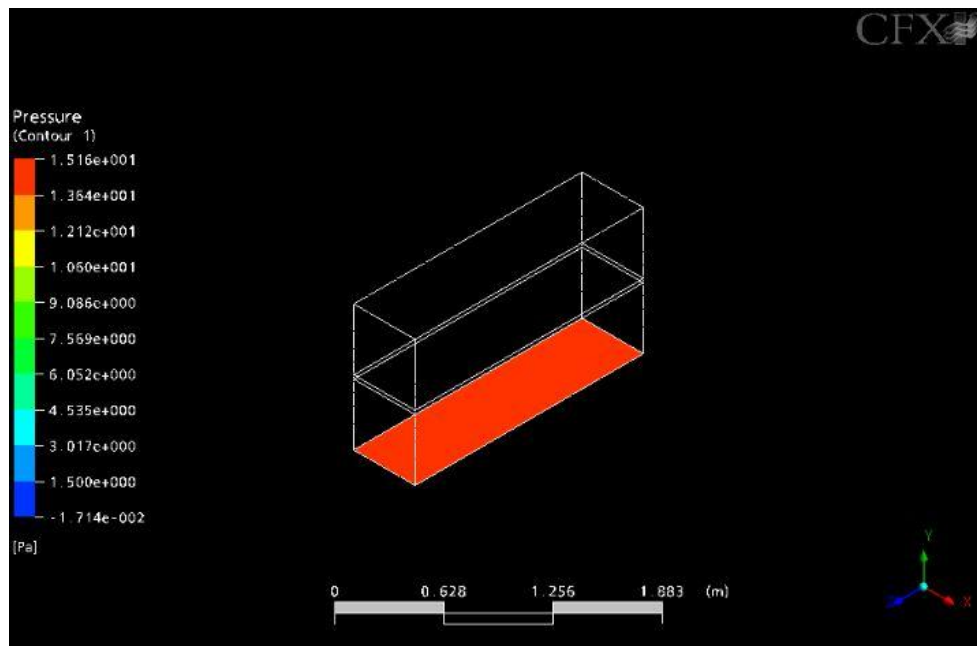


Figura 4. 8: Ilustración del modelo de validación

3.2. SELECCIÓN DEL CASO BASE

Para el caso base se utilizará un diseño básico, siendo el caso más estándar, en función de mejorar la distribución de temperatura y caída de presión se consideraron puntos a mejorar en el diseño.

Éste caso se ha escogido como el caso base, debido a que en la industria, es el modelo que más se consigue, marcando un patrón de referencia para el diseño de las cámaras de secado y además es por esto que el prototipo fue diseñado con estas configuraciones geométricas semi-estandarizadas. El caso cuenta con una entrada rectangular de 200x260 mm, donde el aire entra de manera perpendicular a las bandejas. Esta entrada cuenta con una entrada recta de 200 mm de altura.

Este, al igual que el diseño final, contará con cinco bandejas tipo gabinete de 700x900 mm, de ancho y largo de la cámara respectivamente, de manera que se haga fluir el aire caliente a través de las bandejas de manera uniforme. Entre las bandejas existirá un espaciado de 10 cm para que se pueda utilizar un rastrillo, para asegurar la homogeneidad del secado.

Para la salida se cuenta con una sección rectangular de 200x260 mm, con una altura de 200 mm, de manera que sirva como chimenea para que el aire pueda salir a la atmosfera.

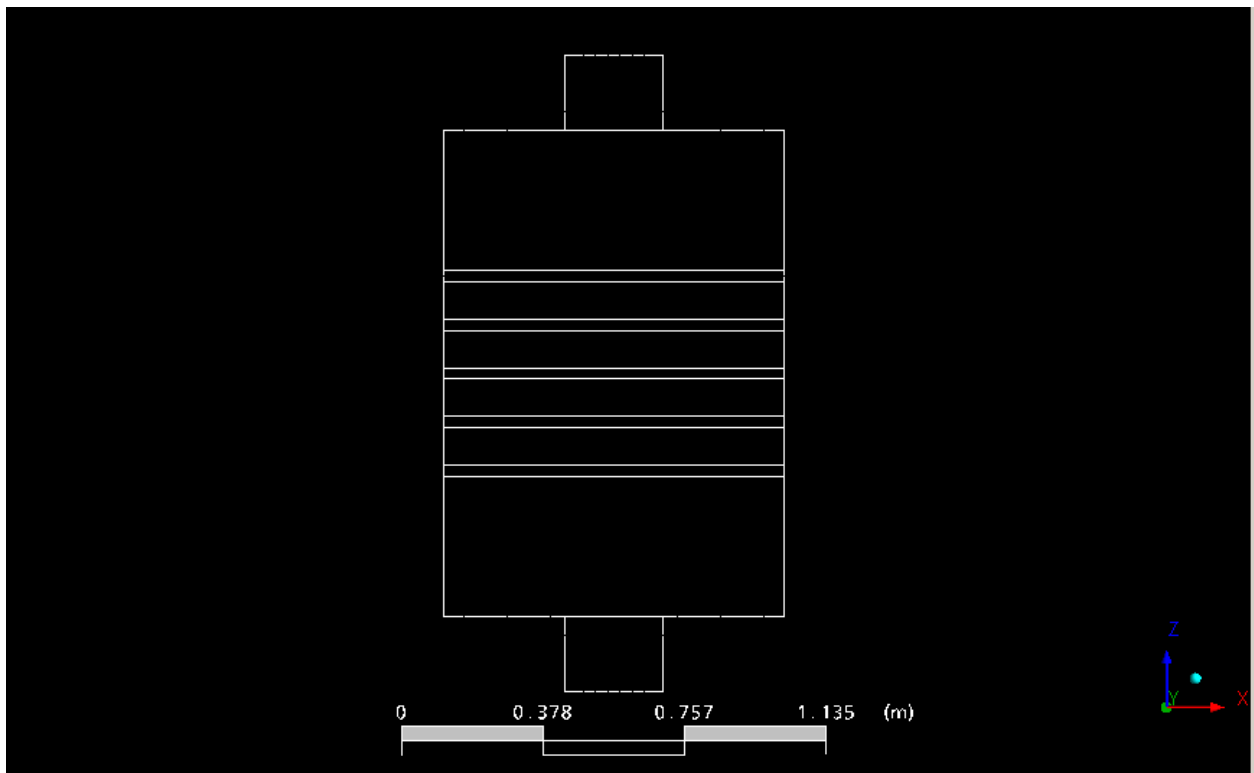


Figura 4. 9: Caso Base

3.3. EVALUACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN Y DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN EL CASO BASE

El caso base se simuló de manera que una vez terminado el proceso y resueltas las ecuaciones numéricamente, se evaluó la caída de presión y distribución de temperatura a lo largo de las bandejas mediante la simulación. Este caso permitió fijar el punto de referencia para los resultados de un modelo estándar, además de identificar los puntos donde se enfocaban las pérdidas y las variables que puedan mejorar el diseño en este aspecto.

Los resultados de esta simulación son el punto de partida para la comparación de las geometrías que incluyen las mejoras consideradas anteriormente.

3.4. GENERACIÓN DE CASOS MODIFICADOS

3.4.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS A VARIAR

En el caso base se identificaron varias fuentes de pérdidas, unas inherentes al diseño (flujo a través de lechos rellenos) y otras asociadas al diseño geométrico de la cámara de secado (ángulos del difusor y la tobera en la entrada y la salida respectivamente) y dirección del flujo de entrada. Una vez corrido el caso base, se identificó en la entrada y la salida un cambio de dirección del fluido muy brusco lo que genera pérdidas significativas por cambio de magnitud y sentido de los vectores de velocidad, por lo cual se identificó como variable susceptible a cambio el ángulo que existe entre el fluido de entrada y salida con la pared de la cámara de secado, tomando en cuenta un fluido perpendicular al plano de la entrada. Para ser coherentes con la idea, además de tener la variable del ángulo geométrico de la pared de la cámara, también es posible variar el ángulo con el que entra el fluido a la cámara.

Por las razones mencionadas anteriormente se decidió variar:

1. Angulo del difusor de la entrada con los siguientes ángulos:
 - 1.1. 22.5° con respecto a la horizontal.
 - 1.2. 45° con respecto a la horizontal.

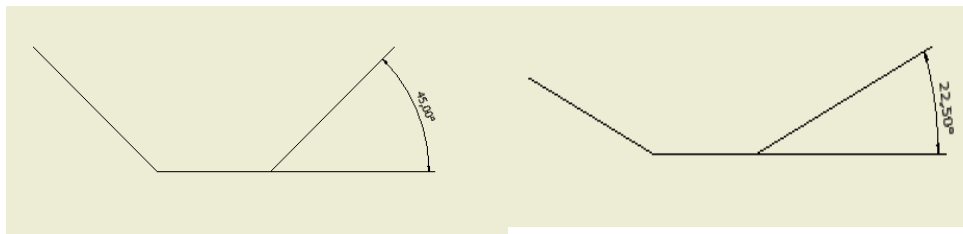


Figura 4. 10: Diferentes ángulos de difusor en la entrada

2. Angulo de la tobera en la salida de la cámara con los siguientes ángulos:
 - 2.1. 22.5° con respecto a la horizontal.
 - 2.2. 45° con respecto a la horizontal.

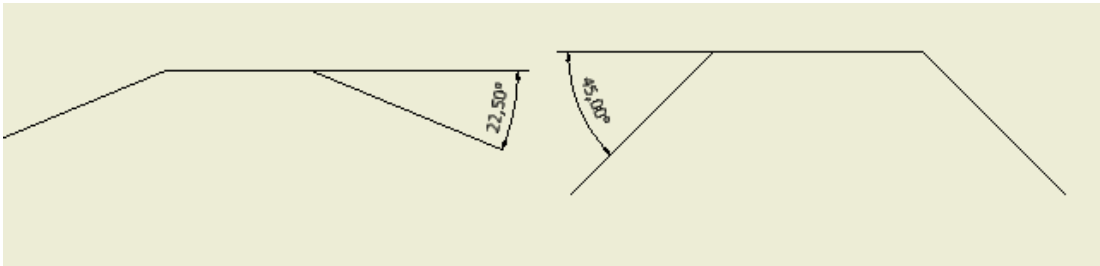


Figura 4. 11: Diferentes ángulos de la tobera de salida

3. Angulo de incidencia del vector velocidad en los siguientes planos:
 - 3.1 Perpendicular al plano de la entrada
 - 3.2. En el plano XZ
 - 45° con respecto a la horizontal

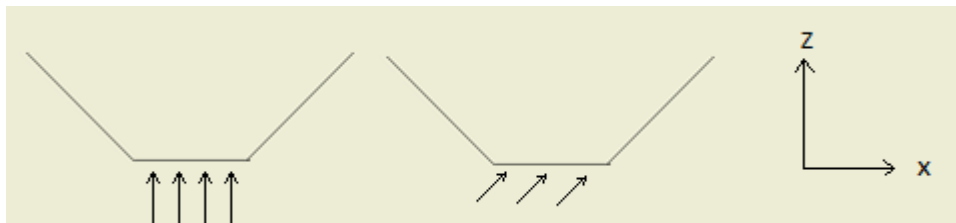


Figura 4. 12: Angulo de incidencia del vector velocidad en plano XZ

- 3.3 En el plano YZ
- 3.4 45° con respecto a la horizontal

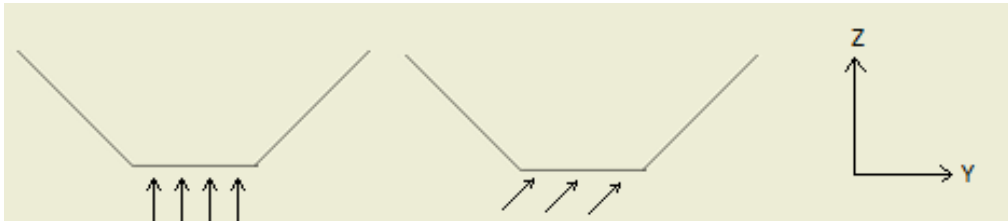


Figura 4. 13: Angulo de incidencia del vector velocidad en plano YZ

Resumen

Caso x-y donde x=1 corresponde a un flujo perpendicular respecto al plano de la entrada, x=2 corresponde a un flujo con un ángulo de 45° respecto al plano de la entrada y paralelo plano XZ y x=3 corresponde a un flujo con un ángulo de 45° respecto al plano de la entrada y paralelo al plano YZ. El subíndice y corresponde a las diferentes combinaciones de ángulos según la tabla 4.1

Tabla 4. 1: Casos para las configuraciones diferentes

Caso	Angulo Difusor entrada	Angulo Tobera salida
Caso 1-1	22.5	22.5
Caso 1-2	22.5	45
Caso1-3	45	45
Caso 1-4	45	22.5

CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados de las simulaciones de las distintas geometrías propuestas en el marco metodológico, para mejorar el flujo a través de la cámara de secado en comparación con la geometría base, dando así inicio a los análisis para poder, primero que nada, discriminar como afectan las variables geométricas en el funcionamiento de la maquina y así hacer la mejor selección de la cámara de secado.

4.1 Caída De Presión

Ya con los resultados obtenidos para la caída de presión en la tabla 4.2 se procede a hacer el análisis de como afectan las variables geométricas y como afecta la dirección de flujo de entrada en el desempeño del equipo y las perdidas de presión presentes en el fluido.

Tabla 4. 2: Caída de presión donde el flujo es perpendicular al plano de la entrada

Flujo de entrada perpendicular	Δ Presión (Pa)
Caso 1-1	2.81
Caso 1-2	4.36
Caso 1-3	1.94
Caso 1-4	1.92

De la tabla anterior se puede observar que la mayor caída de presión se encontró para la configuración que corresponde al caso 1-3, con un valor de 4.36 Pa. Por otra parte la menor caída de presión se consiguió para la configuración que corresponde al caso 1-4, con un valor de 1.92 Pa

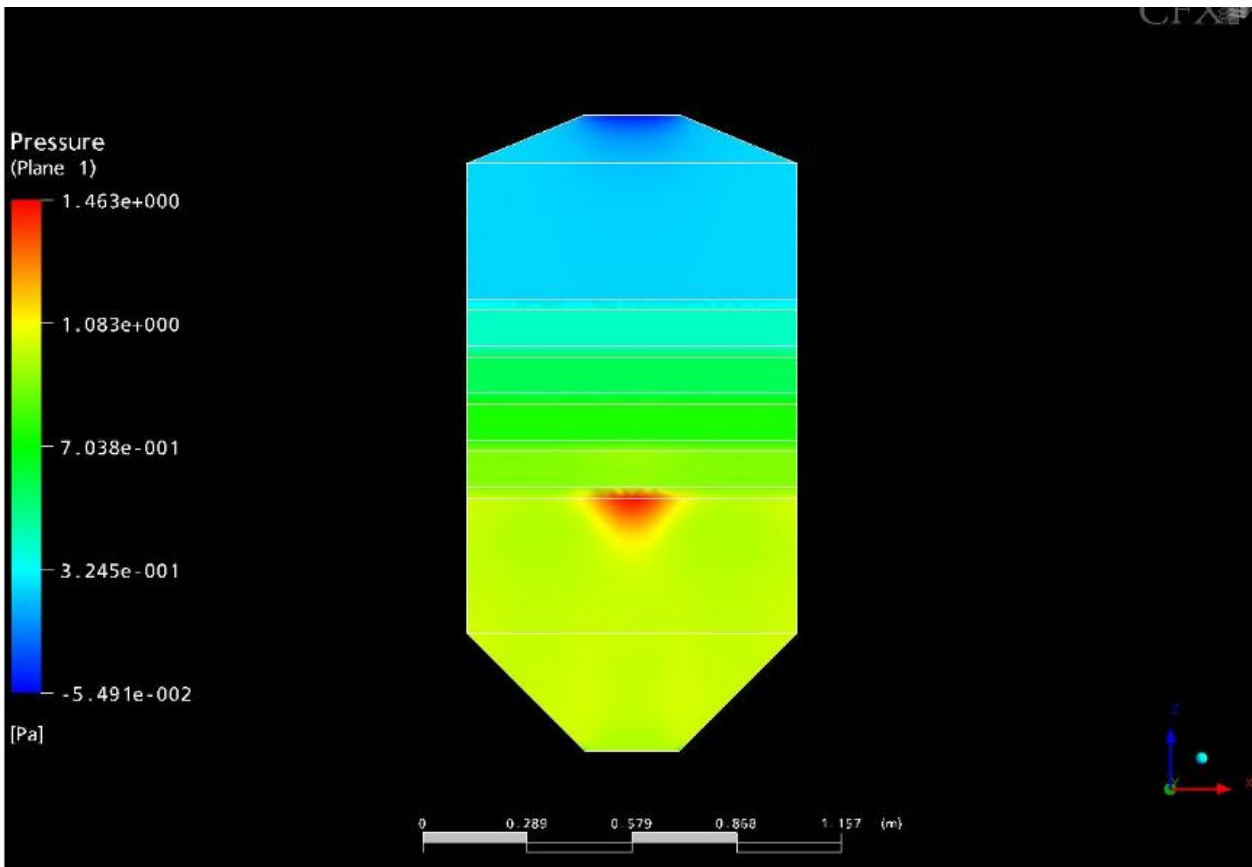


Figura 4. 14: Distribución de presión para el caso 1-4.

En la figura 4.14 se muestra la mejor configuración obtenida entre tobera-difusor para una condición de flujo de entrada perpendicular al plano de la entrada de la cámara, donde se observa una zona de mayor presión (roja) en el punto donde el flujo choca con la primera bandeja. Esta mayor presión se debe a la transformación de energía cinética del fluido en energía de presión. Una vez que el flujo ha superado la

primera bandeja, el flujo se homogeniza, por lo consiguiente la presión se distribuye de manera uniforme a lo largo de la cámara hasta el punto en que la tobera acelera el fluido y disminuye la presión en la zona de la salida.

Tabla 4.3: Caída de presión donde el flujo tiene 45° respecto al plano YZ

Flujo a 45° en el plano YZ	Δ Presión (Pa)
Caso 3-1	1.56
Caso 3-2	2.34
Caso 3-3	0.86
Caso 3-4	0.23

De la tabla 4.3 se puede observar que la mayor caída de presión se encontró para la configuración que corresponde al caso 3-2 con un valor de 2.34 Pa. Por otra parte la menor caída de presión se consiguió para la configuración que corresponde al caso 3-4, con un valor de 0.24 Pa.

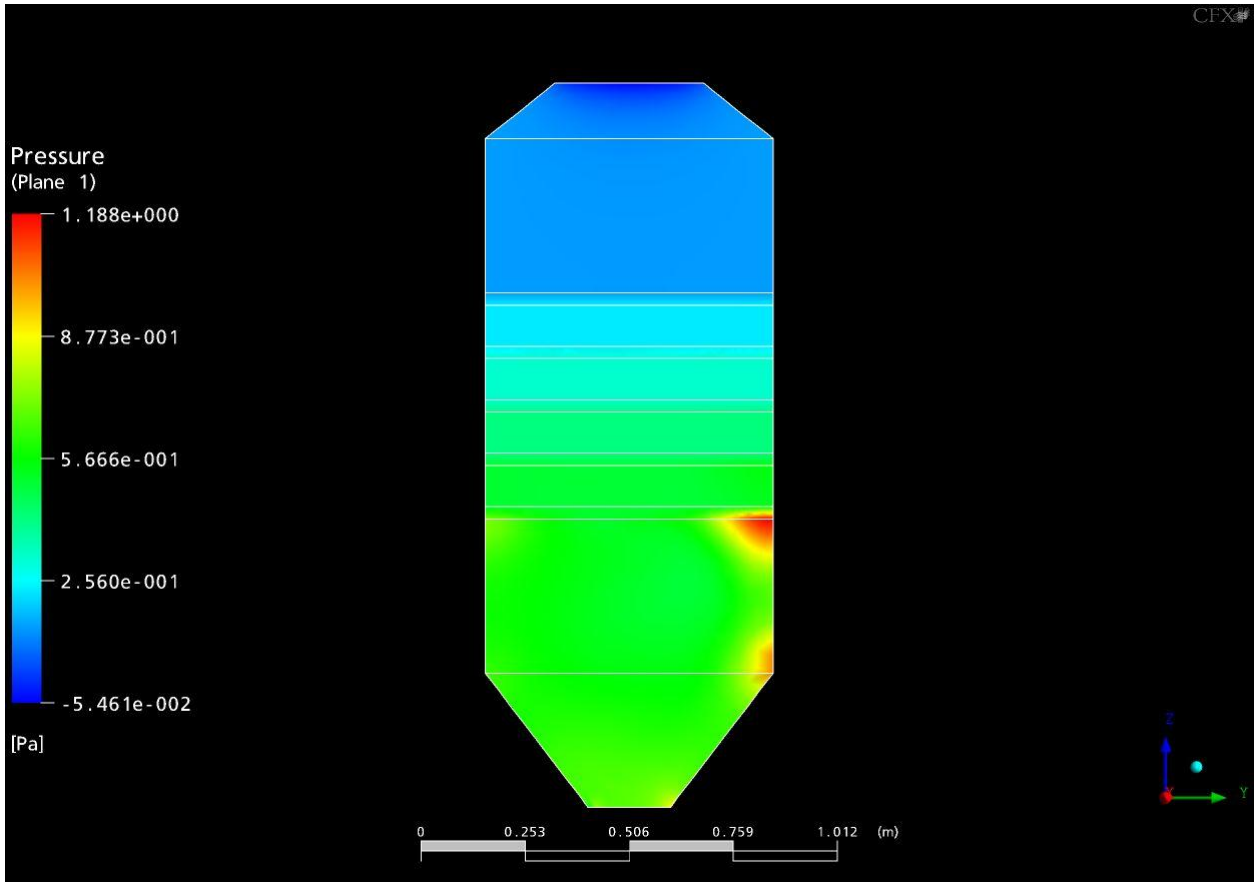


Figura 4. 15: Distribución de presión para el caso 3-4

En la figura 4.15 mostrada anteriormente, se puede observar como se localiza la presión en una de las paredes laterales de la cámara, lo cual se debe a que el flujo entra a la cámara con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, así haciendo que ocurra una reducción de la velocidad y un aumento de presión brusca en dicha pared. Una vez superada la primera bandeja, se puede observar la homogeneidad de la distribución de la presión en los planos paralelos al plano XY, disminuyendo así su valor a lo largo del eje Z.

Tabla 4.4: Caída de presión donde el flujo tiene 45° respecto al plano XZ

Flujo a 45° en el plano XZ	Δ Presión (Pa)
Caso 3-1	1.34
Caso 3-2	2.16
Caso 3-3	0.71
Caso 3-4	0.48

De la tabla 4.4 se puede observar que la mayor caída de presión se encontró para la configuración que corresponde al caso 3-2, con un valor de 2.16 Pa. Por otra parte la menor caída de presión se consiguió para la configuración que corresponde al caso 3-4, con un valor de 0.48 Pa.

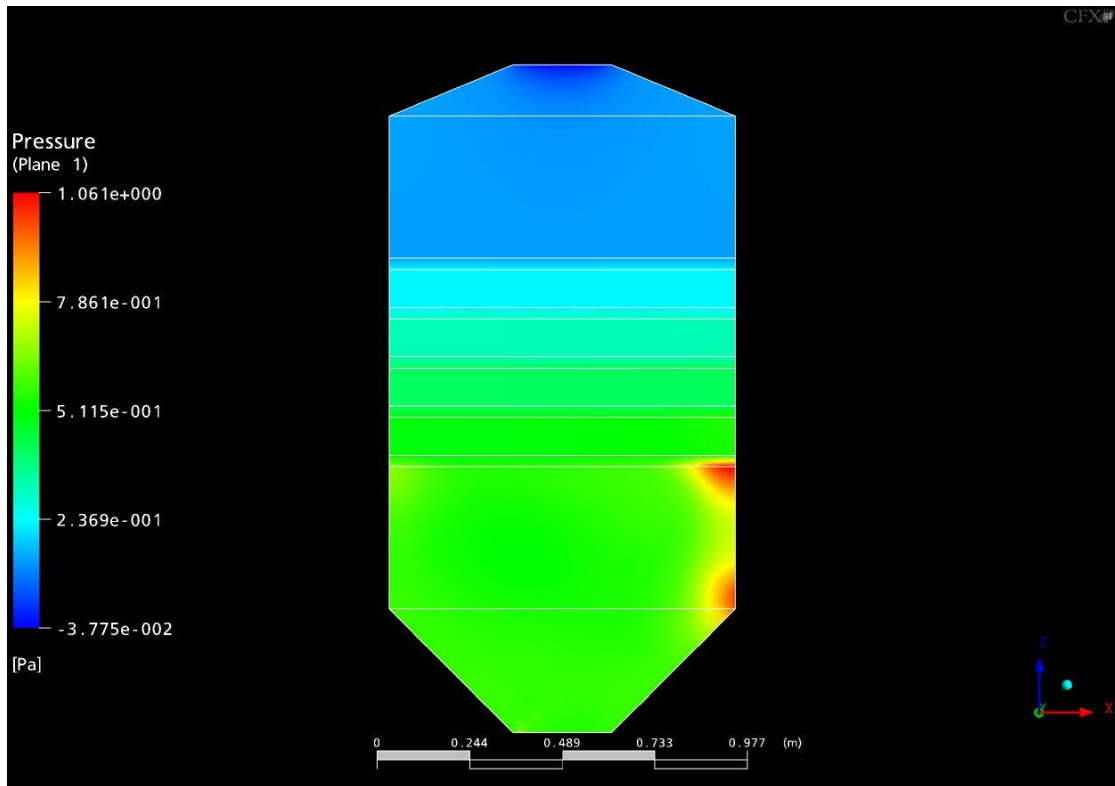


Figura 4. 16: Distribución de presión para el caso 2-4.

En la figura 4.16 mostrada anteriormente, se puede observar como se localiza la presión en una de las paredes laterales de la cámara, lo cual se debe a que el flujo entra a la cámara con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, así haciendo que ocurra una reducción de la velocidad y un aumento de presión brusca en dicha pared. Se puede observar el gradiente de presión en un plano perpendicular al eje Y. Una vez superada la primera bandeja, se puede observar que la presión va disminuyendo poco a poco hasta alcanzar su mínimo valor en la salida de la cámara.

4.2 Distribución De Temperatura

A partir de la tabla 4.5, se puede observar la distribución de la temperatura en la cámara de secado para el caso base, teniendo su máximo valor en la entrada de 326 K y en la salida, el mínimo valor, siendo el mismo 320.7 K, presentando una diferencia de temperatura de 5.30 K.

Tabla 4.5: Distribución de temperatura para el caso base

Flujo de entrada perpendicular	Entrada y Salidas Rectas
Temperatura Entrada (K)	326.00
Temperatura Salida (K)	320.70
Temperatura Bandeja 1 (K)	325.77
Temperatura Bandeja 2 (K)	325.29
Temperatura Bandeja 3 (K)	324.34
Temperatura Bandeja 4 (K)	323.06
Temperatura Bandeja 5 (K)	321.62

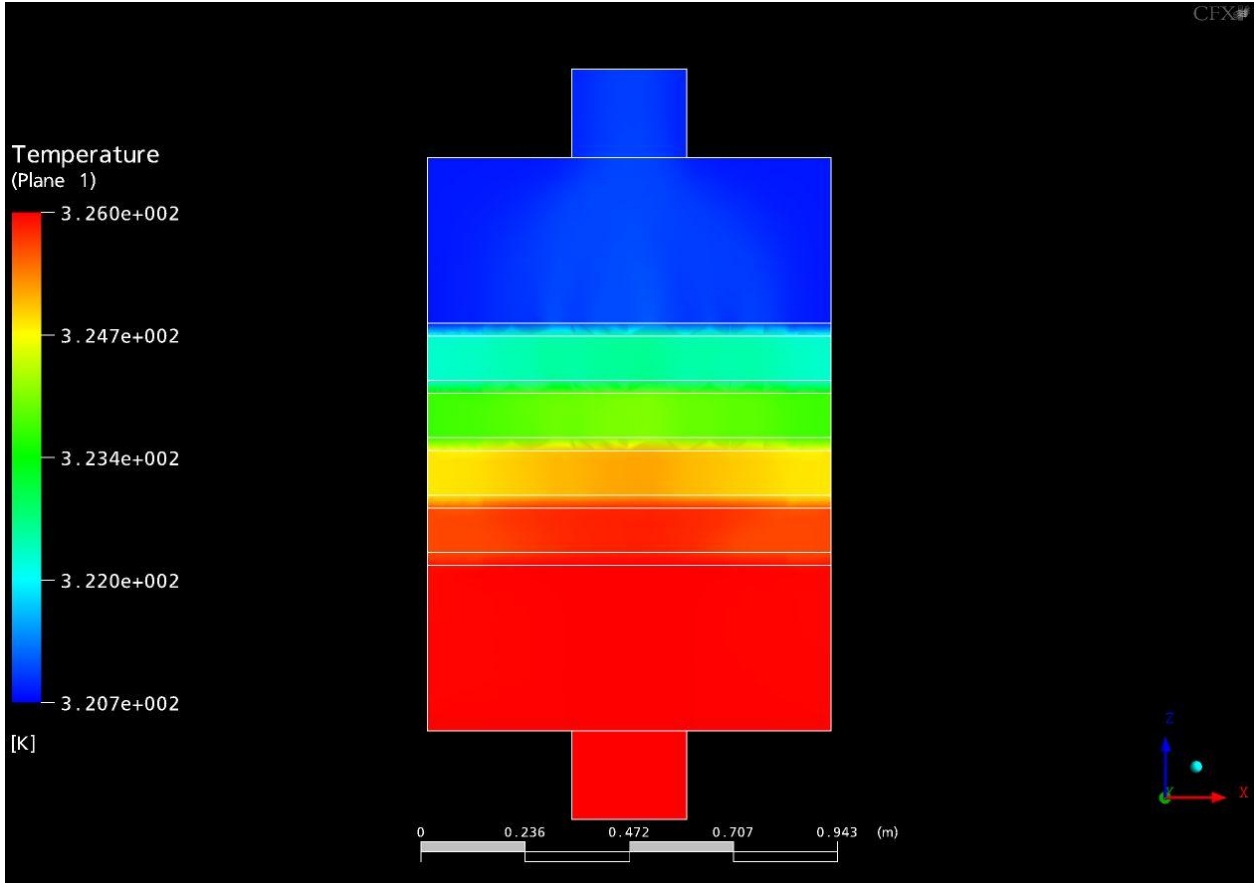


Figura 4. 17: Distribución de temperaturas del caso base, con el flujo de entrada perpendicular al plano XY

En la figura se puede observar como el gradiente de temperatura presente en la cámara de secado va desde una temperatura mayor en la entrada a una menor en la salida con su respectiva leyenda de valores en K.

Tabla 4.6: Distribución de temperatura donde el flujo es perpendicular al plano XY.

Flujo de entrada perpendicular	Caso 1-1	Caso 1-2	Caso 1-3	Caso 1-4
Temperatura Entrada (K)	326.00	326.00	326.00	326.00
Temperatura Salida (K)	321.56	321.37	320.71	320.71
Temperatura Bandeja 1 (K)	325.80	325.82	325.76	325.80
Temperatura Bandeja 2 (K)	325.28	325.35	325.18	325.28
Temperatura Bandeja 3 (K)	324.41	324.50	324.20	324.41
Temperatura Bandeja 4 (K)	323.29	323.38	322.93	323.29
Temperatura Bandeja 5 (K)	322.00	322.02	321.50	322.00

A partir de la tabla se pueden observar los valores correspondientes a la temperatura en las configuraciones posibles difusor-tobera escogidas, donde la mayor caída de temperatura entre entrada y salida corresponde al caso 1-4, siendo de 5.29 K y la menor caída de temperatura corresponde al caso 1-2, siendo la misma de 4.63 K

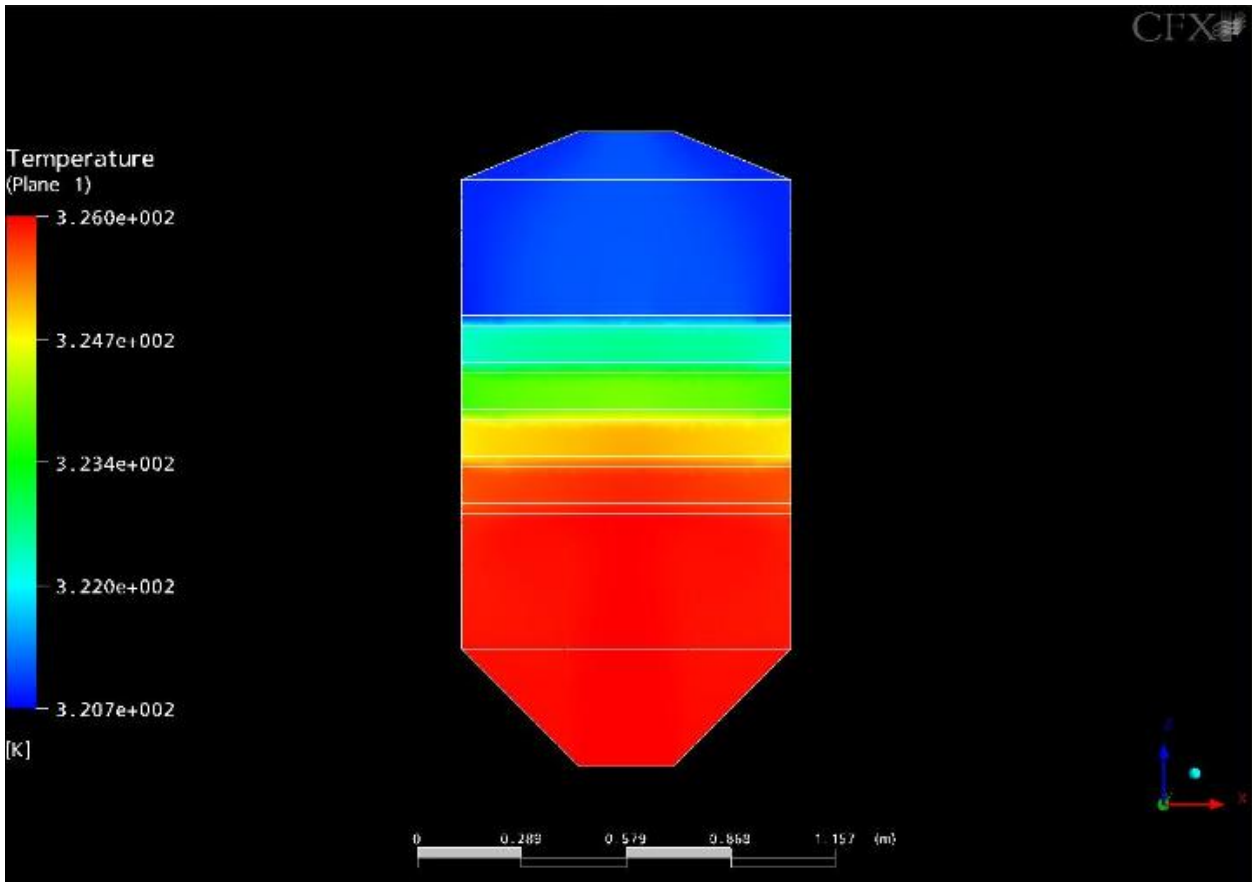


Figura 4. 18: Distribución de temperaturas para el caso 1-4.

De la figura 4.18 podemos observar el gradiente de temperatura en la cámara de secado, donde la zona roja corresponde a la zona de mayor temperatura, la azul a la de menor temperatura, y el resto a temperaturas intermedias.

Tabla 4.7: Distribución de temperatura donde el flujo de entrada entra a 45° con respecto al plano XZ

Flujo de entrada a 45° plano XZ	Caso 2-1	Caso 2-2	Caso 2-3	Caso 2-4
Temperatura Entrada (K)	326.00	326.00	326.00	326.00
Temperatura Salida (K)	321.00	321.00	320.34	320.35
Temperatura Bandeja 1 (K)	325.80	325.80	325,77	325.77
Temperatura Bandeja 2 (K)	325.28	325.28	325,17	325.17
Temperatura Bandeja 3 (K)	324.39	324.35	324,09	324.09
Temperatura Bandeja 4 (K)	323.15	323.15	322,74	322.74
Temperatura Bandeja 5 (K)	321.80	321.80	321,23	321.23

A partir de la tabla se pueden observar los valores correspondientes a la temperatura, para la entrada de velocidad paralela al plano XZ con 45° respecto al plano de la entrada. Para estos casos específicos, la mayor caída de temperatura se observa para el caso 2-4, con un valor de 5.65 K y la menor caída de temperatura se tiene para el caso 2-2, con un valor de 5.00 K

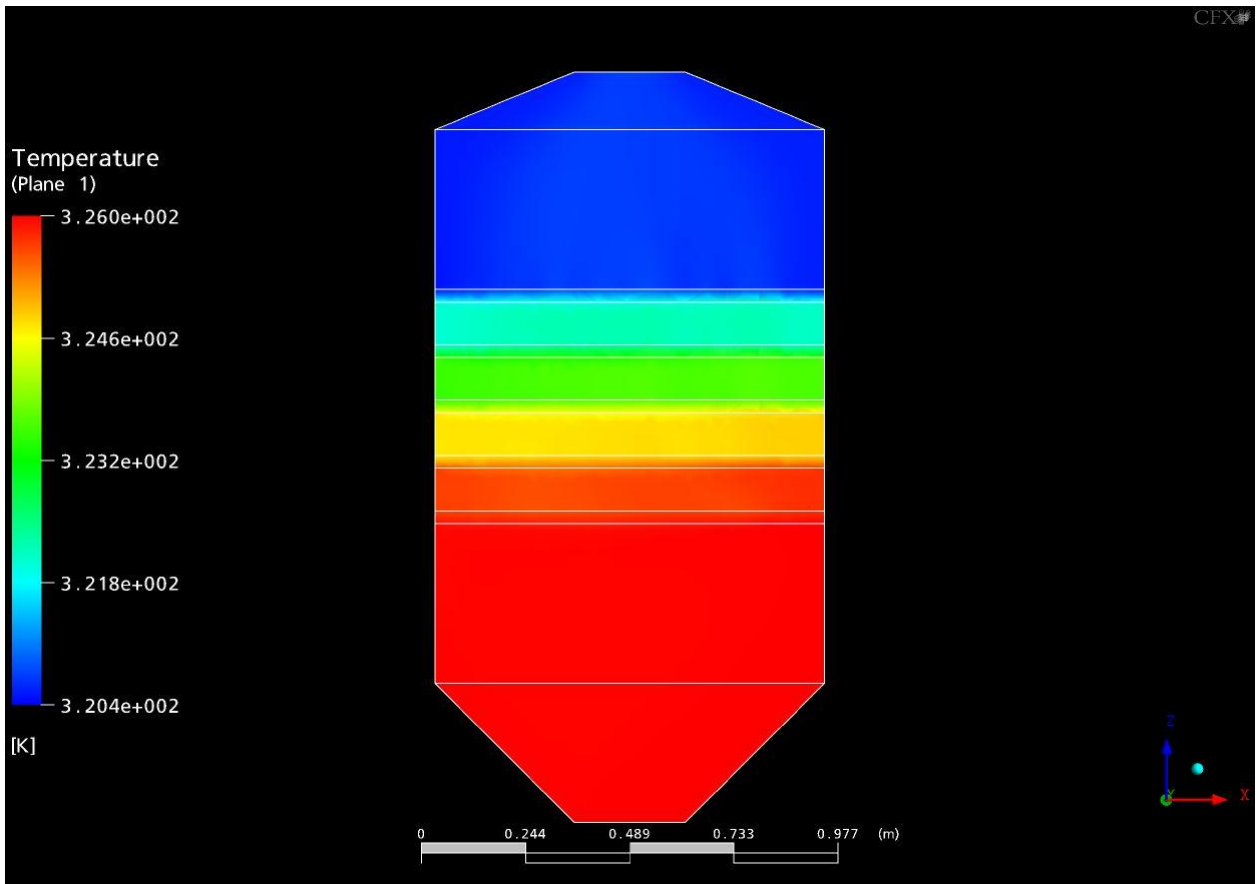


Figura 4. 19: Distribución de temperaturas con el flujo de entrada a 45° respecto al plano de entrada, paralelo al plano XZ

En la figura se puede observar el gradiente de temperatura para el caso donde ocurre la mayor caída de temperatura de los resultados obtenidos para ésta dirección en la velocidad de entrada.

Tabla 4.8: Distribución de temperatura donde el flujo de entrada entra a 45° con respecto al plano YZ.

Flujo de entrada a 45° plano YZ	Caso 3-1	Caso 3-2	Caso 3-3	Caso 3-4
Temperatura Entrada (K)	326.00	326.00	326.00	326.00
Temperatura Salida (K)	321	321	320.36	320.36
Temperatura Bandeja 1 (K)	325.78	325,78	325.64	325,64
Temperatura Bandeja 2 (K)	325.28	325.28	325.19	325.19
Temperatura Bandeja 3 (K)	324.35	324.35	324.11	324.11
Temperatura Bandeja 4 (K)	323.15	323.15	322.76	323.35
Temperatura Bandeja 5 (K)	321.79	321.79	321,27	321.91

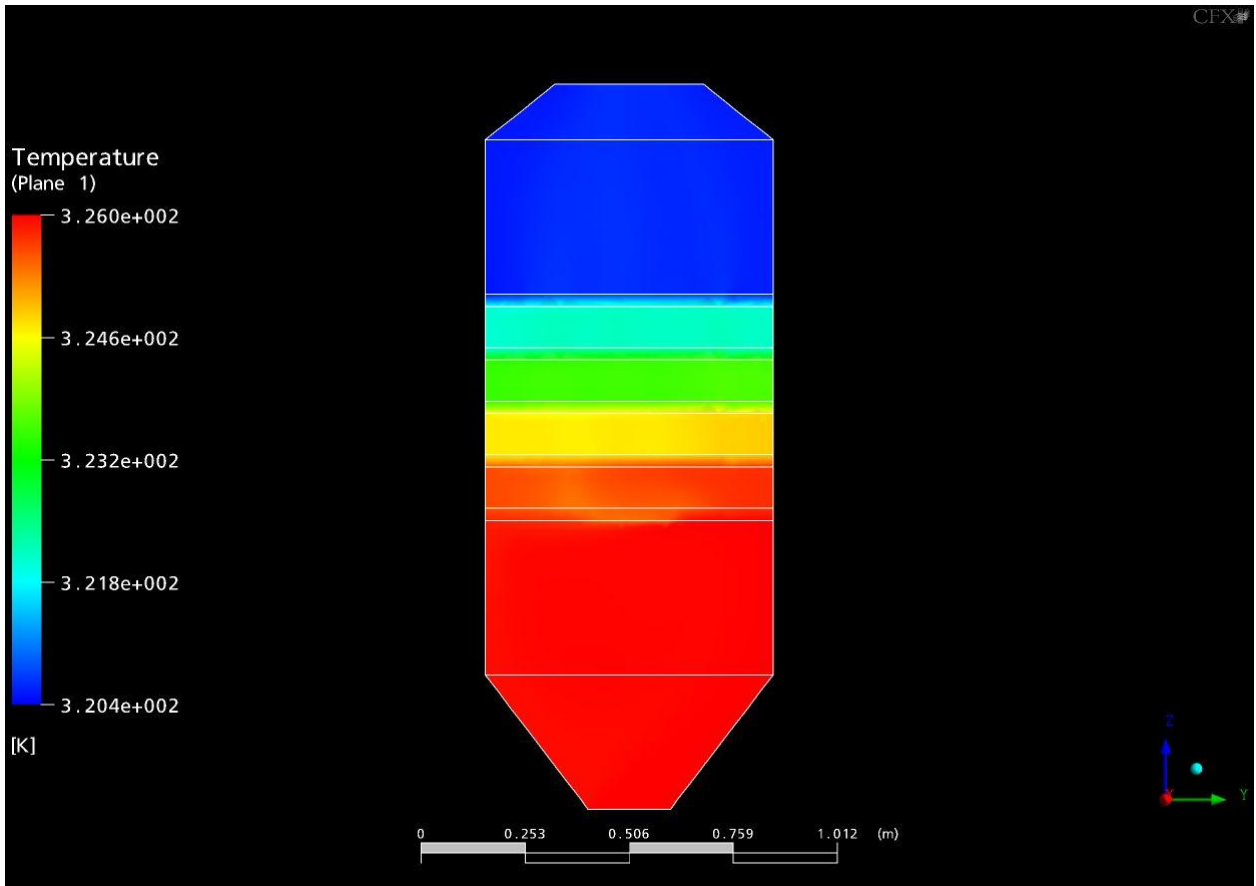


Figura 4. 20: Distribución de temperatura para el caso 3-4.

En la figura se observa la distribución de temperatura para la configuración dada, con un valor de temperatura de entrada de 326 K y un valor mínimo de temperatura de salida de 320.4 K

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se puede observar que al variar el ángulo del difusor de entrada obtenemos menores caídas de presión con un valor de 45°, esto se debe a que siendo un difusor mas grande, reduce la velocidad de entrada del fluido y a su vez permite una distribución uniforme del flujo másico al entrar a la cámara de secado reduciendo las pérdidas turbulentas, es importante tomar en cuenta

que al variar los vectores de velocidad ya sea en su magnitud, dirección o sentido, se generan pérdidas, estas son llamadas perdidas menores. La tobera a 45° evita estos cambios bruscos, lo que se traduce en una reducción de las mismas.

Se debe tomar en cuenta que al colocar un difusor de 45° el volumen ocupado entre la entrada y la primera bandeja, será mayor al disponible al colocar un difusor de 22.5° debido a que el área de entrada se debe mantener constante. Este mayor volumen se traduce en una presión menor en esta parte de la cámara de secado.

En concordancia con lo mencionado anteriormente, el difusor a 45° permite que el flujo de aire atraviese la primera bandeja de una manera más uniforme, de ésta manera, todos los granos que se encuentran en esta bandeja, reciben calor en mayor medida. En las figuras numero 4.21 y 4.22 es posible observar el efecto del difusor de entrada en la distribución de velocidades y sus efectos turbulentos

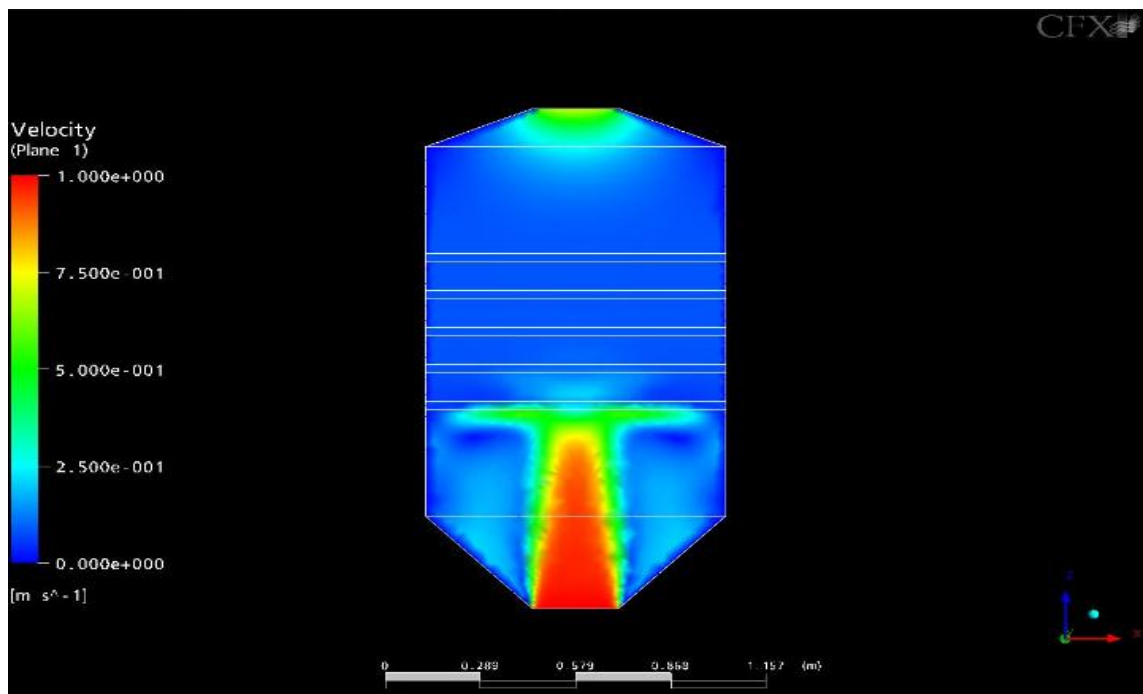


Figura 4. 21: Distribución de velocidad para el caso 1-4.

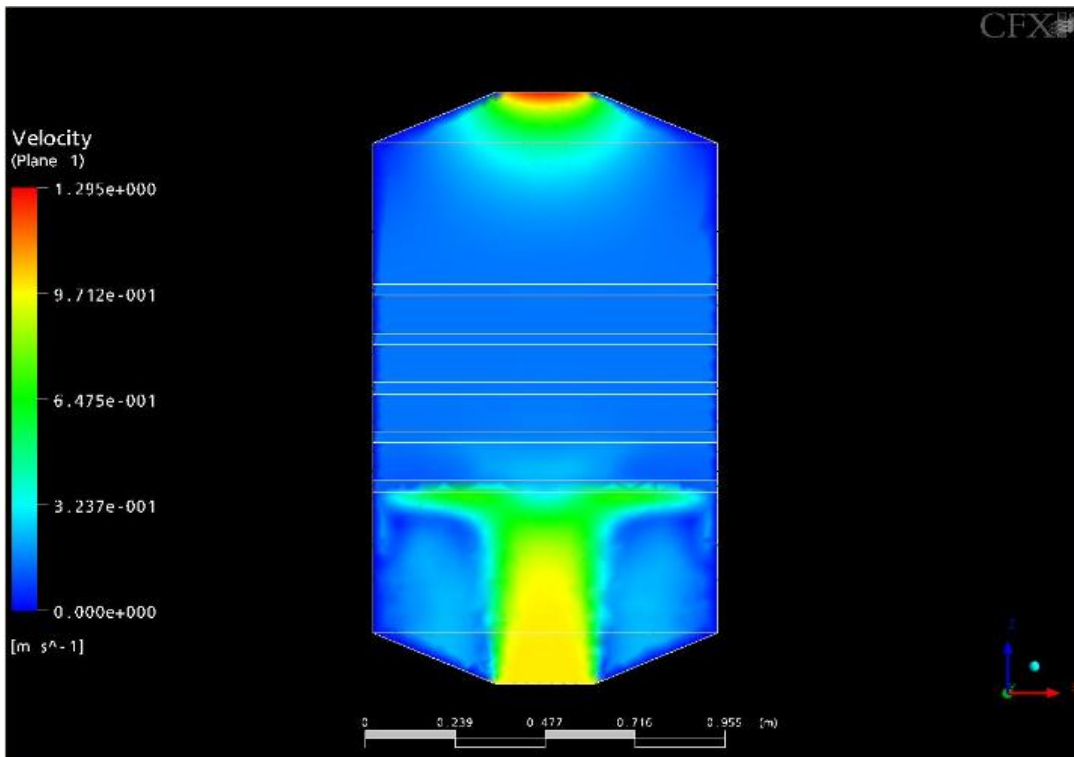


Figura 4. 22: Distribución de velocidad para el caso 1-1

Al comparar los efectos de las toberas en la salida, se pudo observar que no altera la distribución de temperatura de la cámara ya que se encuentra aguas abajo luego de que todo el proceso de transferencia de calor se ha llevado a cabo en las bandejas. Ya que el efecto de la tobera no es tan significativo, desde un punto de vista energético, si lo es desde un punto de vista práctico al captar aquellas gotas de agua que se condensan en las paredes de la cámara y las canalice evitando que caigan de nuevo sobre el producto deshidratado. En las figuras 4.23 y 4.24 es posible observar que al variar la tobera en la salida, no se altera la distribución de temperatura

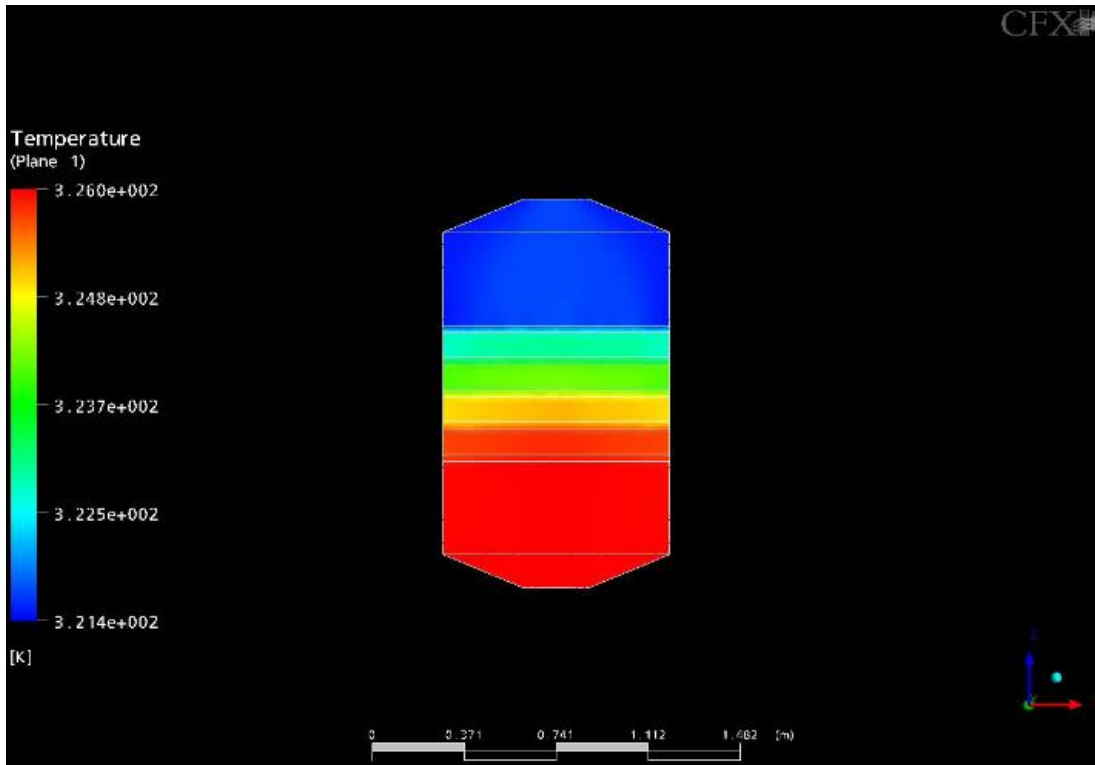


Figura 4. 23: Distribución de temperatura con una tobera de salida de 22,5°

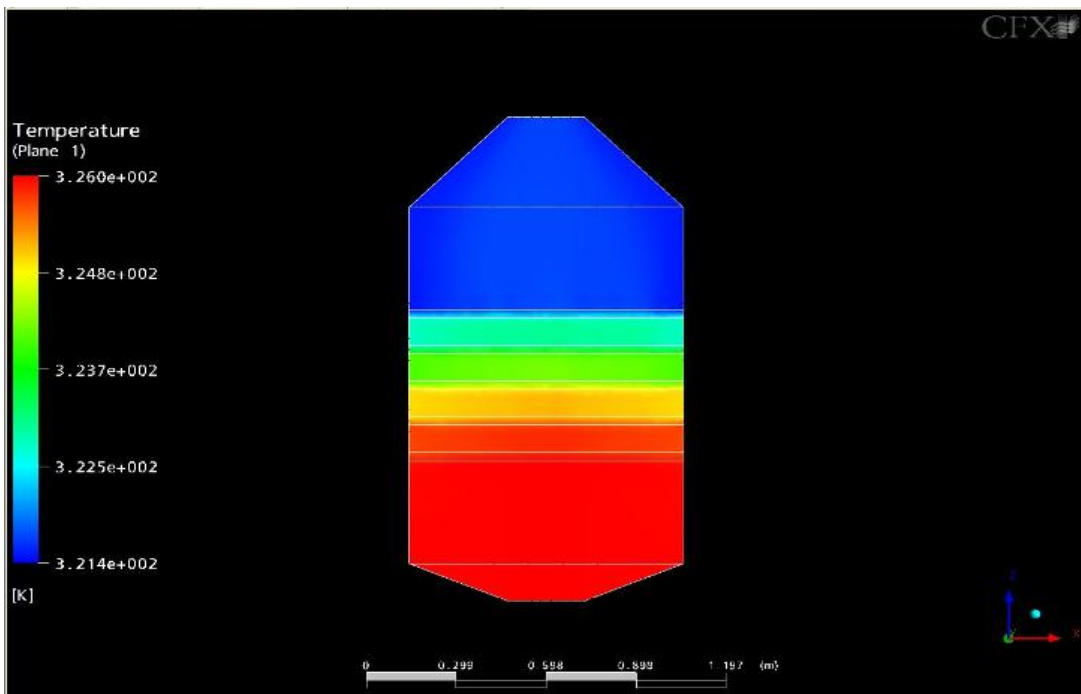


Figura 4. 24: Distribución de temperatura con una tobera de salida de 45°

Al analizar los resultados de distribución de temperatura y caída de presión tomando en cuenta la variable de vector de velocidad del fluido en la entrada, se analizaron tres casos, primero, que para un ángulo de 45° con respecto al plano de entrada que a su vez sea paralelo al plano XZ, se obtienen menores caídas de presión, motivado a que la cercanía entre el ángulo del difusor y la dirección del flujo evita el choque entre el fluido de trabajo y los elementos que componen la cámara de secado y estos a su vez trabajan re-direccionando suavemente el fluido a lo largo de la cámara, reduciendo así, pérdidas por turbulencias y evitando bruscos cambios de dirección, lo cual reduce las pérdidas menores.

Segundo, en contraste con lo anterior, al analizar el caso donde el vector de velocidad del flujo es perpendicular al plano de la entrada, el flujo de trabajo choca directamente con la primera bandeja, reduciendo bruscamente su velocidad y cambiando su dirección, esto aumenta considerablemente las pérdidas menores y los efectos turbulentos, para este caso también se puede observar el aumento de presión, por la reducción de velocidad, enfocado en el punto de choque entre el fluido y la bandeja.

Y tercero, se encontró un caso intermedio con la configuración de vector de velocidad de entrada a 45° con respecto al plano de entrada y paralelo al plano YZ, análogamente, al primer caso, el beneficio de este arreglo radica en la cercanía del vector de velocidad de entrada y el ángulo del difusor, con la limitación de que la sección es de menor tamaño, obligando a que los cambios sean un poco mas pronunciados que el primer caso pero mas suaves que el caso extremo donde el flujo entra perpendicular al plano de la entrada.

Se debe considerar que a pesar del aumento de pérdidas menores, con ésta configuración con la entrada perpendicular al plano de entrada, se obtiene una excelente distribución del aire a través de la bandeja, lo cual se evidencia en la figura 4.25.

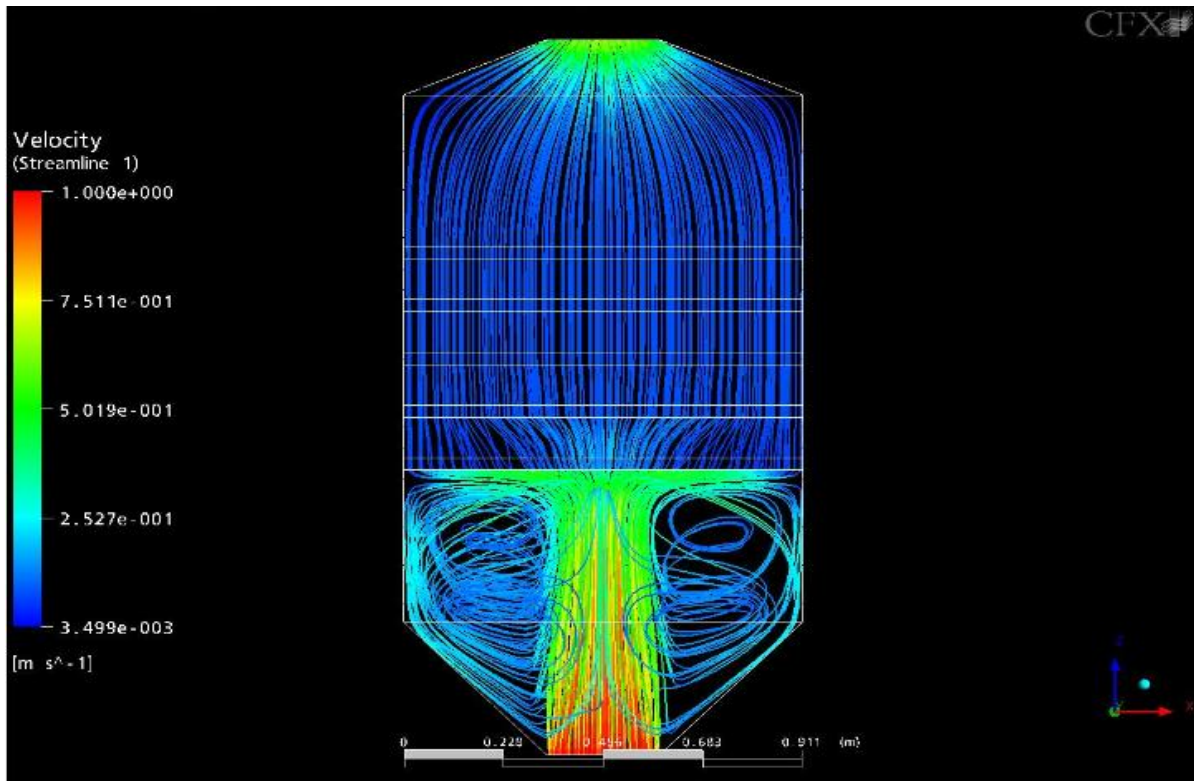


Figura 4. 25: Líneas de corriente para una velocidad de entrada de flujo perpendicular al plano de entrada.

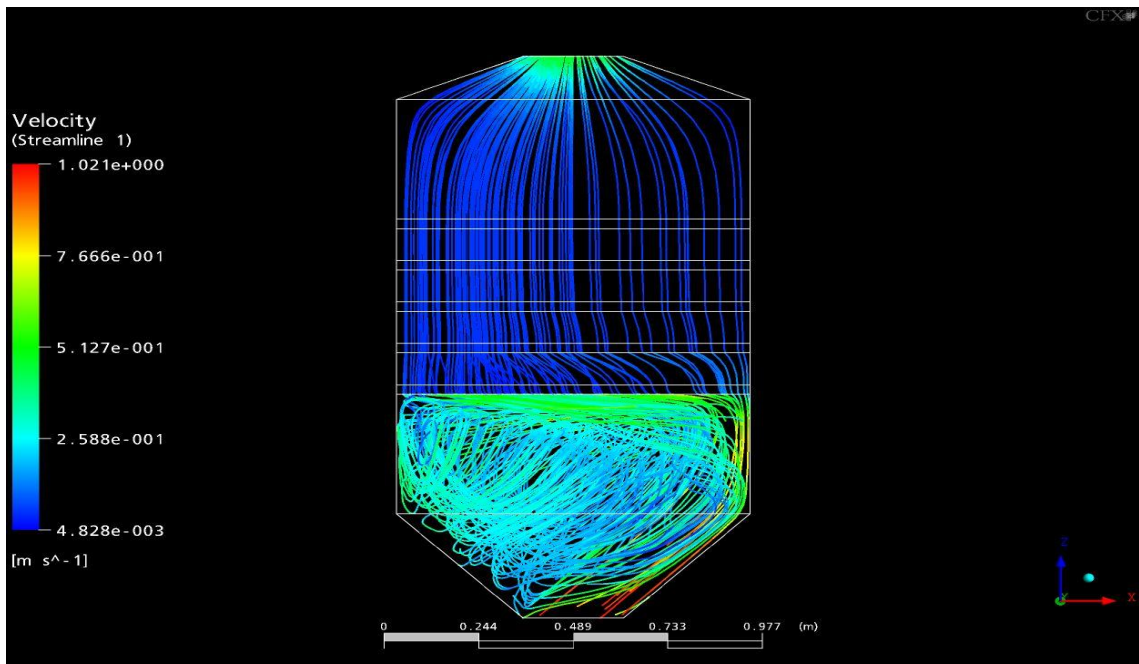


Figura 4. 26: Líneas de corriente para el caso 2-4.

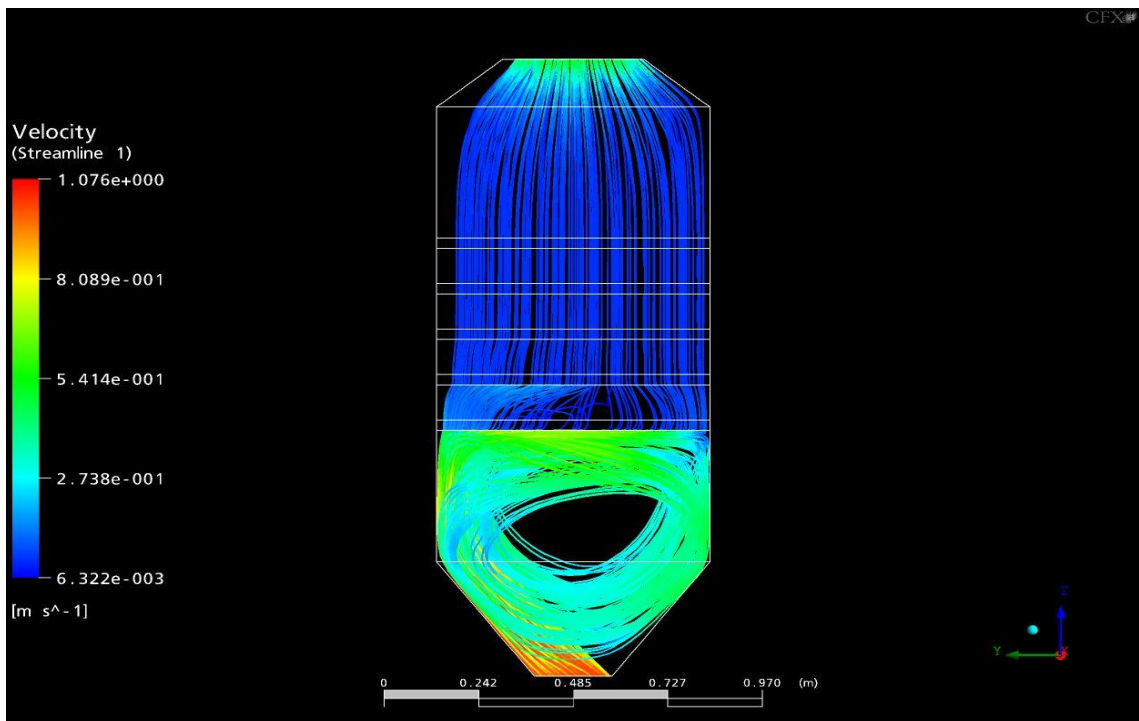


Figura 4. 27: Líneas de corriente para el caso 3-4

A pesar de que se tiene diferente dirección de flujo, intensidad de turbulencia en la entrada de la cámara y distribución del fluido a través de las bandejas, la distribución de temperatura se mantiene prácticamente invariable en las direcciones de los ejes X y Y, pero bajo otras condiciones de entrada, el gradiente de temperatura en estos ejes podría ser significativo, para este caso la distribución de temperatura varía de manera importante en la dirección del eje Z, tal como se muestra en las figuras 4.28, 4.29 y 4.30:

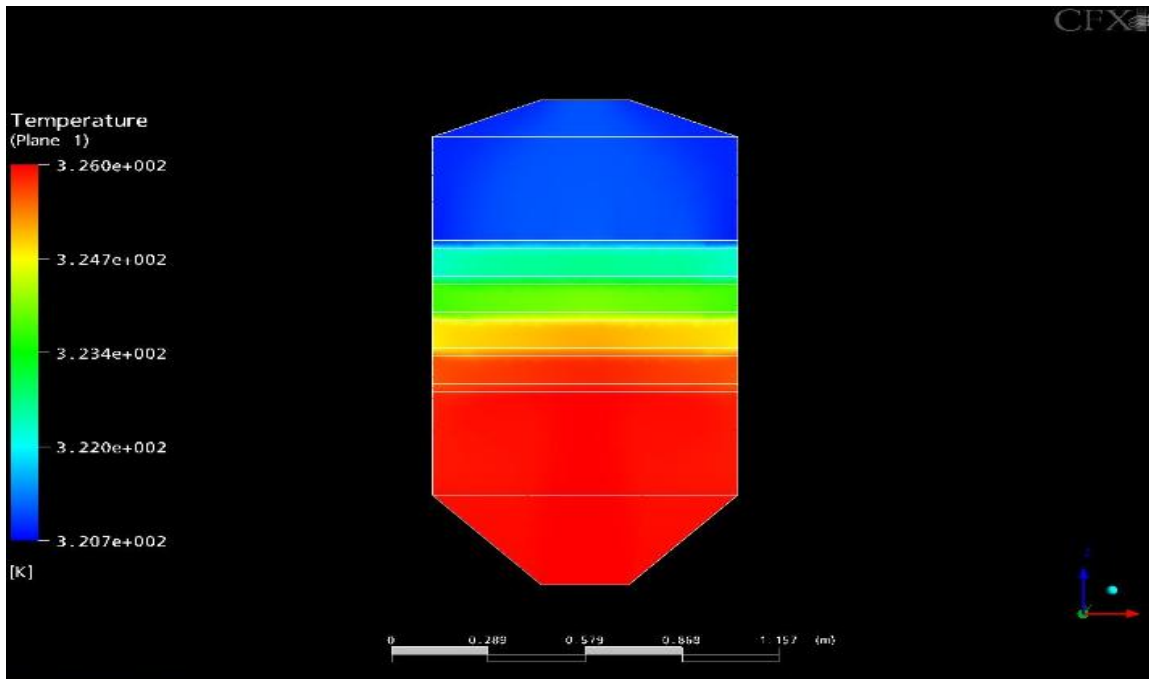


Figura 4. 28: Distribución de temperatura para una velocidad de entrada perpendicular al plano de entrada, caso donde el centro de las bandejas está mas caliente que en los bordes

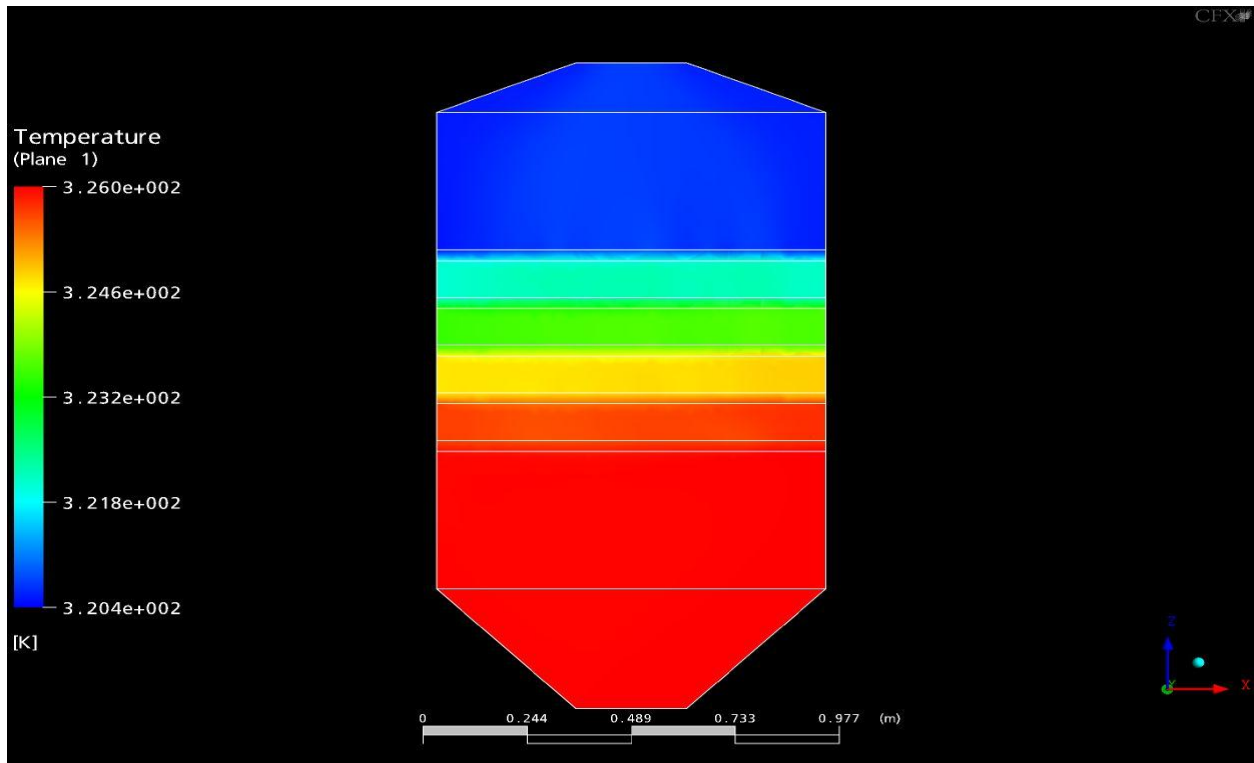


Figura 4. 29: Distribución de temperatura para el mejor caso con respecto a caída de temperatura, es decir, el caso 2-4.

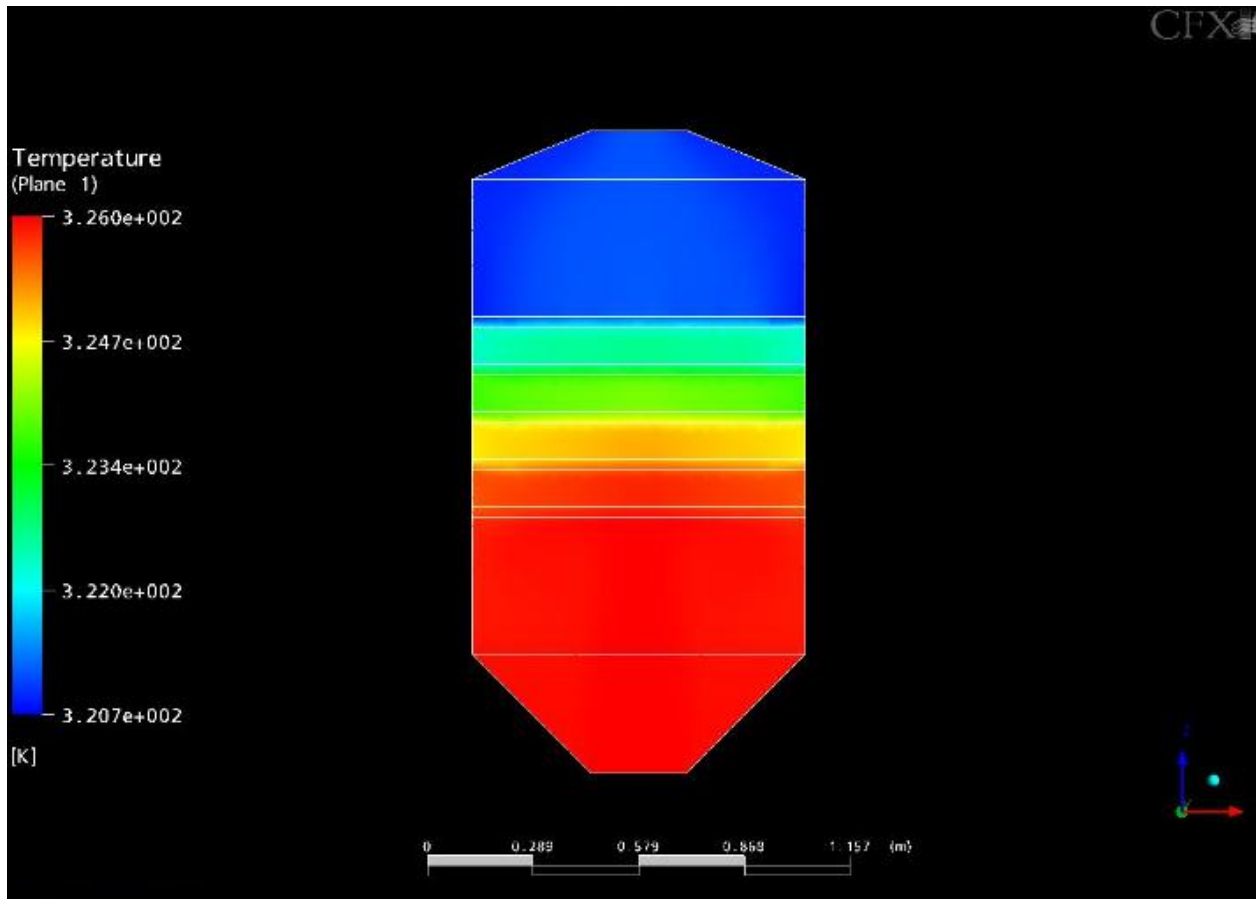


Figura 4. 30: Distribución de temperatura para el caso 3-4.

Una vez analizadas las tres variables escogidas en el trabajo, se pudo observar que existen dos criterios de selección posibles, donde el primero se basa en las pérdidas, donde el objetivo es reducir la caída de presión. El segundo criterio se basa en una mejor de distribución de temperatura en cada bandeja o en la mejor distribución de temperatura.

Para los resultados obtenidos y en función de los criterios mencionados anteriormente, tendríamos entonces que:

1. Para el criterio de pérdidas o caída de presión, el mejor arreglo corresponde a la configuración propuesta por el caso 3-4.
2. Para el criterio de transferencia de calor, el mejor arreglo corresponde a la configuración propuesta por el caso 2-4.

En las siguientes figuras 4.31 y 4.32, se puede observar el campo de vectores de velocidad para los dos casos mencionados anteriormente.

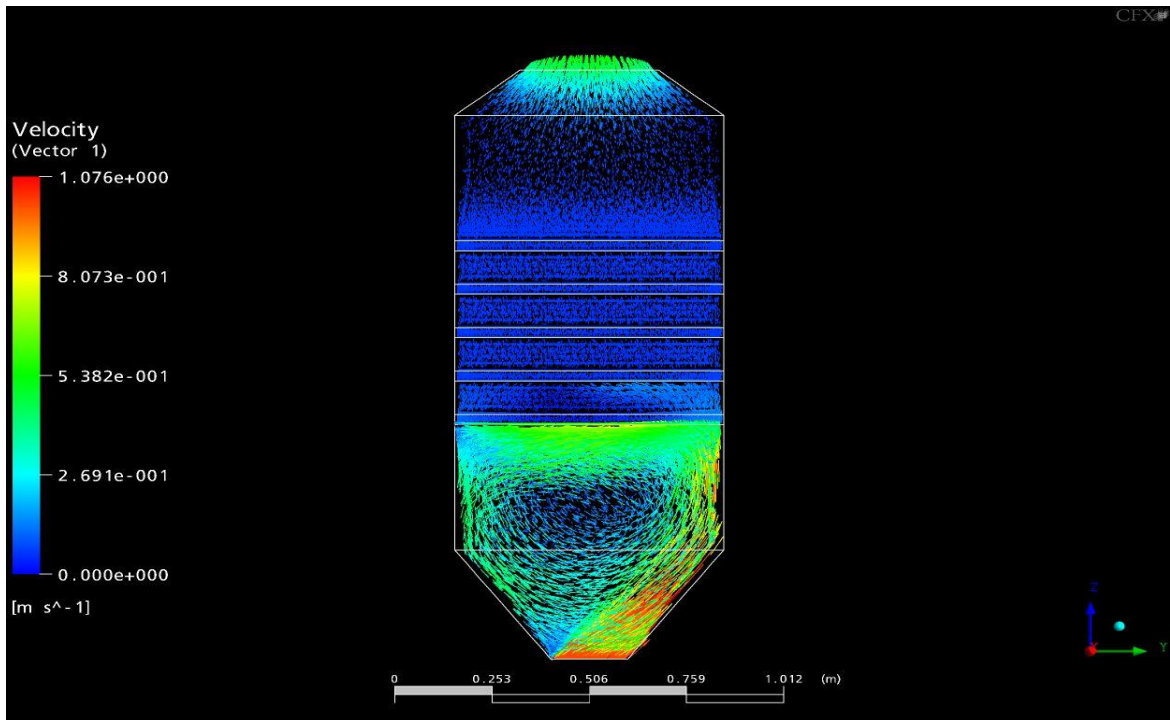


Figura 4. 31: Campo de velocidades para el criterio de pérdida por caídas de presión

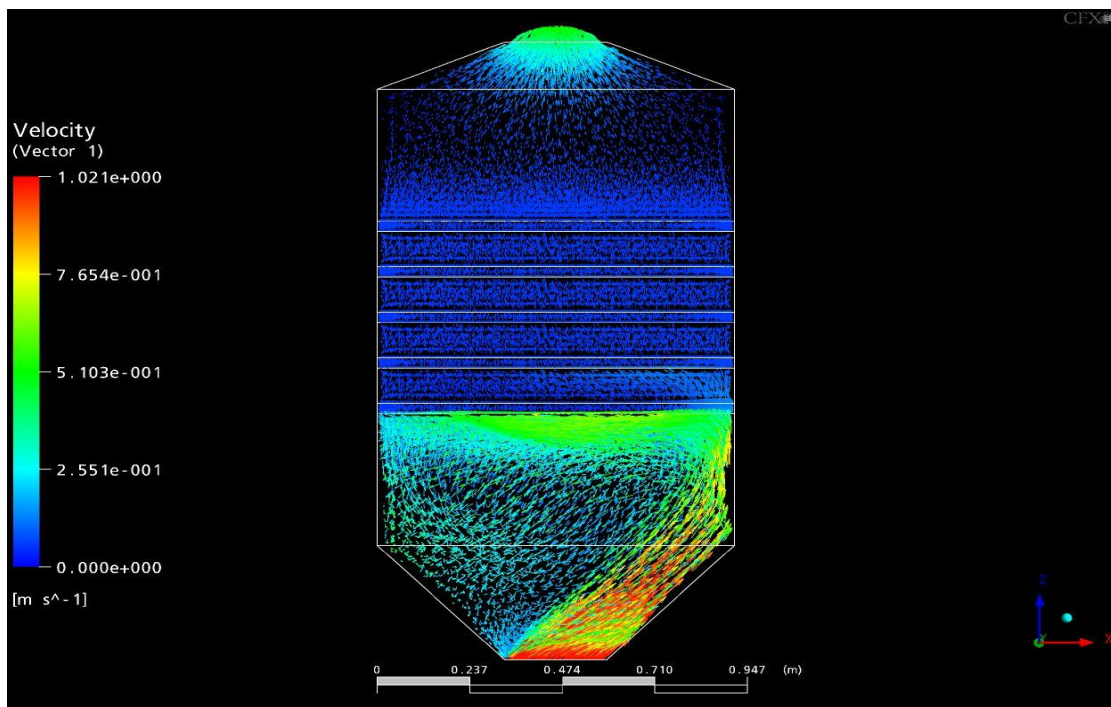


Figura 4. 32: Campo de velocidades para el criterio de pérdidas por transferencia de calor

Con la finalidad de evaluar el efecto del modelo de turbulencia en los resultados obtenidos, se simularon tres casos, el caso 1-1, el segundo caso simulado fue el 1-1, y el tercer caso el 3-4 con el modelo k-e y el SST. En las figuras 4.34 y 4.35, se puede observar que los resultados no presentan cambios significativos en la velocidad, de igual manera, se verificó que la caída de presión y temperatura también presentan resultados muy parecidos con error menor al 5%.

Tabla 4. 9: Tabla comparativa de modelos de turbulencia

Caso	ΔPresión	ΔTemperatura	Modelo de Turbulencia
1-3	1.90	5.29	k-épsilon
1-3	1.90	5.29	SST
1-1	2.81	4.44	k-épsilon
1-1	2.71	4.25	SST
3-4	0.48	5.65	k-épsilon
3-4	0.42	5.48	SST

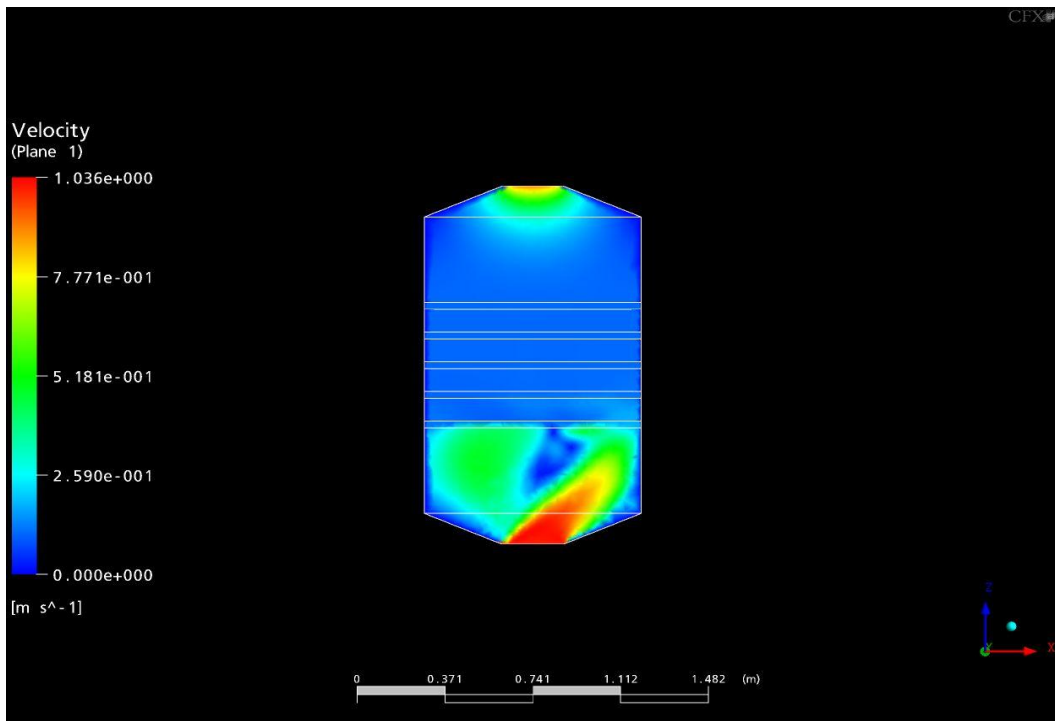


Figura 4. 33: Distribución de velocidad con modelo de turbulencia K-epsilon

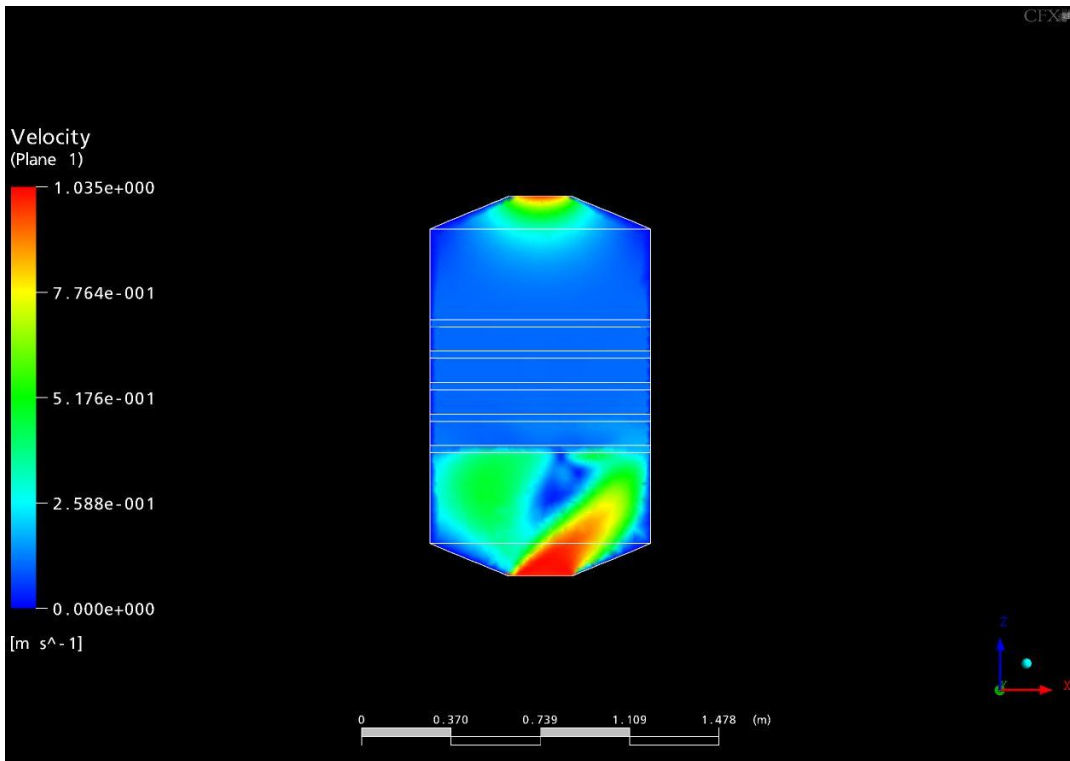


Figura 4. 34: Distribución de velocidad para el mismo caso de la figura 4.28 con modelo de turbulencia SST

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

En este capítulo se enumeran a continuación las conclusiones a las cuales se pudo llegar después de haber realizado las distintas pruebas y las simulaciones nombradas anteriormente.

- Tomando en cuenta el criterio de transferencia de calor, se obtiene que la mejor configuración es: difusor de entrada a 45° , tobera de salida a $22,5^\circ$ e incidencia del ángulo del vector velocidad a 45° con respecto al plano de la entrada y paralelo al plano XZ

- Tomando en cuenta las variaciones de incidencia del ángulo del vector velocidad en la entrada, se concluyó que es importante el diseño del vínculo entre el colector solar con respecto a la cámara de secado, ya que de esto dependerá la dirección del flujo de entrada.

- Partiendo desde el criterio de caídas de presión por pérdidas en el sistema, tienen mayor peso las pérdidas menores que las pérdidas por fricción, ya que el recorrido del fluido es corto, por ende, es necesario cuidar el diseño para evitar cambios bruscos de dirección, magnitud y sentido de los vectores de velocidad del flujo.

- Para este problema, los resultados son independientes del modelo de turbulencia que se pueda escoger ya que los resultados obtenidos para los dos casos probados, son muy parecidos con un error menor al 5%.

CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

Con la finalidad de darle continuidad o extender los alcances expuestos en el presente trabajo podemos acotar las siguientes recomendaciones.

1. Variar el ángulo del difusor de la entrada para valores superiores a 45° respecto a la horizontal.

2. Variar las dimensiones de la geometría de la entrada, por una sección rectangular más grande.

4. Variar las dimensiones de la geometría de la salida, por una sección rectangular más grande.

5. Disminuir la velocidad en la sección de la entrada a un 30% de la velocidad máxima de fluidización.

6. Generar una geometría con múltiples entradas para estudiar el comportamiento del fluido dentro de la cámara.

LISTA DE SIMBOLOS

Letras Latínas

A área de la cama del producto [m^2]

D_p diámetro de la partícula [m]

e espesor [m]

g Aceleración de gravedad = 9.81 [m/s^2]

G_o velocidad másica del fluido circulante

h_f Nomenclatura de perdidas [Pa]

h_{fg} Calor latente de vaporización del agua [kJ/kg]

h_{tot} Entalpía específica total [kJ/kg]

\dot{m}_a flujo másico [kg/s]

\dot{q} tasa de flujo de calor por unidad de volumen [W/m^3]

S_M fuente de momentum [N/mK^2]

S_E fuente de energía [N/K^3]

T temperatura [K]

T_p temperatura del producto [K]

U velocidad [m/s]

V Volúmen de la cama del producto [kg/m^3]

Letras Griegas

δ delta de kronecker

ϵ fracción de huecos del lecho

ϕ esfericidad de la partícula

ρ_p Densidad del producto [kg/m³]

μ viscosidad dinámica [kg/s*m]

ω humedad absoluta

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

Ansys Inc. (2006) “CFX Reference Handbook”.

Bermúdez J., Maiz V. (2004) “Diseño Y Construcción De Un Secador De Alimentos De Origen Vegetal En El Estado Amazonas” Trabajo Especial de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

C. Ratti, A.S Mujumdar. (1996) “Secador Solar De Alimentos: Modelado Y Simulación Numérica”. Québec, Canadá.

Costa. A.; Ferreira S. (2007) “Sistema De Secado Solar Para Frutos Tropicales” Brasil.

G. L. Visavale (2012) “Principles, Classification And Selection Of Solar Dryers” editorial Hii; Singapur.

Larios L., Teixeira J. (2004) “Diseño Y Construcción De Un Deshidratador indirecto De Cacao Mediante El Uso De Aire Calentado Por Energía Solar” Trabajo Especial de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; Universidad Central de Venezuela; Caracas; Venezuela.

Levenspiel O. (2004) “Flujo de fluidos, intercambio de calor” Editorial Reverté, México.

Lopardo A., Torres G. (2012) “Modelo de la operación transitoria de un deshidratador solar para secado de cacao”, Trabajo Especial de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; Universidad Central de Venezuela; Caracas, Venezuela.

Maureira, J. (2006) “Diseño Y Simulación De Un Secador De Granos De Cacao Con Colectores Solares Planos Mediante Convección Forzada Para Una Capacidad De 500 kg”. Ecuador.

Meza M., Carvallo D. (2012) “Diseño de un Secador Solar de Placas Planas prototipo para pruebas en laboratorio” Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico; Universidad Central de Venezuela; Caracas, Venezuela.

Miranda G. (2011) “Evaluación Del Proceso De Secado De Granos De Cacao fermentado, En Un Secador De Bandejas Con Convección forzada De Aire” Trabajo Especial de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Químico; Universidad de Oriente. Barcelona; Venezuela.

Potter M., Wiggert D. (2002) “Mecanica de Fluidos” Editorial Mc Graw Hill.

R. Abalone; A. Gastón, M.A. Lara (2000) “Simulación Numérica Del Proceso De Secado De Un Material Anisotrópico”. Argentina.

Santamarina J., Cho G (2004).” Soil behavior: The role of particle shape”.

Vivas. J (2011). “Cacao Cosecha Fermentación y Secado”. Fundación Proyecto Paria, Unión Europea de Naciones y CESVI.