



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **Diseño de un secador de lecho fluidizado para café**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Erik Esmix Lopez Maza**

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

**Piura, julio de 2024**

### Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Erik Esmix Lopez Maza, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 74504413.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:  
"Diseño de un secador de lecho fluidizado para café"  
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis<sup>1</sup> para optar el Título profesional<sup>2</sup> de Ingeniero Mecánico-Eléctrico.
2. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
  - Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana, identificado con DNI N° 02850726
3. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
4. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
5. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
6. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 10/03/2024.



.....  
Firma del autor optante<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

<sup>2</sup> Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

<sup>3</sup> Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.

***Dedicatoria***

*A Martha y Martin por su amor y dedicación,  
a Hector y Eedyh por su fortaleza y constancia,  
a Damary y Kaory, mi motivación,  
a Brianna y María, mis ángeles.*



## **Agradecimientos**

A los doctores e ingenieros Daniel Marcelo y Raúl La Madrid, por permitirme ser parte del proyecto "Análisis comparativo técnico económico de tecnologías para mejora del secado de café: Diseño, construcción y pruebas de un secador de lecho fluidizado vs secador solar de tipo convectivo" que fue financiado por el CONTRATO N° PE501081575-2023 PROCIENCIA, Esquema Financiero E041-2023-03 "Proyectos de Desarrollo Tecnológico".

A PRONABEC por financiar mis estudios superiores y el asesoramiento continuo.

A los miembros de mi familia que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme.

A mis amistades universitarios, en especial a Mileny Dávila y Jorge Zeta.



## Resumen

Como parte del proyecto que busca comparar tecnologías para el secado de granos de café se pone a disposición el presente trabajo de investigación cuyo objetivo principal es brindar el dimensionamiento adecuado para que granos de café experimenten la fluidización por medio de aire circundante, cuya temperatura será elevada usando resistencias eléctricas.

Son dos las secciones en que se dividió el trabajo a realizar. La primera consiste en determinar las dimensiones de un secador tipo lecho fluidizado donde el café será almacenado para luego fluidizar en una cámara o reactor gracias al empuje que el aire, proveniente de un *blower*, ejerza sobre los granos.

Para ello se ha estudiado un secador de este tipo instalado en la Universidad de Piura para así obtener una visión de cómo se da la fluidización y realizar mejoras. A la vez fue necesario conocer las características con las que el café ingresará al reactor, ya que es en base a esas condiciones que se pueden determinar límites de diseño y construcción.

La segunda sección consistió en diseñar una cámara que contenga resistencias eléctricas y calcular la potencia necesaria para que el aire circundante, absorbido y dirigido por un ventilador regenerativo, caliente a una temperatura máxima de 70 °C. Ha sido necesario conseguir información de resistencias eléctricas para no sobredimensionar el diseño.

Se consideraron dimensiones comerciales de tubería para el diseño de la cámara, será tipo cilíndrica con una entrada de forma cónica en cuyo interior existe un deflector para generar turbulencia dentro de la cámara y la salida de la misma forma para recuperar la velocidad con la que ingresó el aire. Las resistencias eléctricas deben ser cuatro, cada una con su circuito *on/off* y de temperatura para evitar la fundición de éstas.

En la bibliografía estudiada se encontraron varias investigaciones donde la masa a fluidizar es menor a 2 kg, lo cual es una base para este proyecto donde se busca fluidizar como máximo 5 kg de café tipo pergamino. Se ha concluido que la distribución no uniforme del aire sobre el lecho no logra levantar todos los granos de café en un reactor tipo cilíndrico, por lo que se propone el uso de un reactor tipo cónico.

## Tabla de contenido

Introducción .....	13
Capítulo 1 Aspectos generales del café y lechos fluidizados .....	14
1.1 Producción de café .....	14
1.1.1 Terreno para la instalación de cafetales .....	14
1.1.2 Selección de semillas y plantaciones .....	15
1.1.3 Sistema de agroforestería .....	16
1.1.4 Cosecha de granos de café .....	17
1.2 Humedad y métodos de secado .....	19
1.2.1 Humedad .....	19
1.2.2 Métodos de secado de granos de café .....	20
1.3 Impacto económico del secado .....	21
1.4 Teoría de fluidización .....	22
1.4.1 Lechos fluidizados .....	23
1.5 Análisis termodinámico en lechos fluidizados .....	25
Capítulo 2 Teoría para el diseño de secador y calentamiento de aire .....	26
2.1 Características físicas del café .....	26
2.1.1 Clasificación según Geldart .....	26
2.1.2 Diámetro equivalente .....	27
2.2 Velocidades relacionadas a la fluidización .....	27
2.2.1 Velocidad superficial .....	28
2.2.2 Velocidad de mínima fluidización .....	28
2.2.3 Velocidad terminal .....	28
2.2.4 Comparación de trabajos relacionados a la fluidización .....	29
2.3 Estudio de las dimensiones para el diseño del secador .....	30
2.3.1 Soplador .....	30
2.3.2 Estructura .....	31
2.3.3 Cámara de calentamiento .....	32
2.4 Cálculo de potencia para elevar la temperatura del aire .....	33

Capítulo 3 Experimentación de la fluidización.....	34
3.1 Características del secador a utilizar.....	34
3.2 Estudio de la distancia y geometría donde se desarrolla el flujo de aire .....	37
3.3 Geometría del lecho del café .....	40
3.4 Geometría de la columna de secado.....	41
3.5 Velocidad de mínima fluidización para diferentes masas de café.....	43
Capítulo 4 Diseños en <i>software</i> de simulación .....	49
4.1 Análisis de flujo de aire variando parámetros de diseño.....	49
4.2 Secador de lecho propuesto .....	62
4.3 CFD del calentamiento de aire.....	64
4.3.1 Resistencias en el contorno de la cámara .....	64
4.3.2 Resistencias en arreglo tubular en el centro de la cámara .....	65
4.3.3 Resistencias en espiral distanciadas no uniformemente.....	66
4.3.4 Resistencias en espiral distanciadas uniformemente.....	67
4.4 Flujo de aire en el secador propuesto.....	68
4.5 Dimensionamiento del prototipo.....	70
Capítulo 5 Resultados.....	72
5.1 Resumen de resultados para fluidizar diferentes masas de café .....	72
5.2 Estimación del proceso de secado .....	75
5.3 Resumen de materiales para el calentamiento de aire .....	77
5.4 Resumen de materiales para el secador .....	79
Conclusiones.....	81
Recomendaciones .....	82
Referencias.....	83
Anexos .....	85
Anexo A Ensamble general.....	86
Anexo B Vista lateral del ensamble.....	87
Anexo C Resistencia eléctrica escogida.....	88
Anexo D Ubicación de resistencias eléctricas .....	89

Anexo E Plano del lecho de granos .....90



### Lista de tablas

Tabla 1 Condiciones para las zonas de vida de un cafeto.....	14
Tabla 2 Valores de propiedades físicas a utilizar .....	27
Tabla 3 Resumen de trabajos con secadores de lecho fluidizado cilíndricos .....	29
Tabla 4 Estudio del blower a utilizar .....	31
Tabla 5 Datos al realizar pruebas con 500 g de café.....	44
Tabla 6 Resumen de material para construir el secador .....	79



## Lista de figuras

Figura 1 Recursos ambientales y tecnológicos .....	15
Figura 2 Zona de elección de granos para semilla .....	15
Figura 3 Plantaciones de cafeto .....	16
Figura 4 Sistema de agroforestería .....	17
Figura 5 Producción nacional de café .....	18
Figura 6 Funcionamiento de despulpadora .....	18
Figura 7 Tipos de secadores .....	20
Figura 8 Secadores solares .....	21
Figura 9 Costos de producción de café en una hectárea .....	22
Figura 10 Caída de presión vs velocidad en la fluidización .....	23
Figura 11 Estados de lechos .....	24
Figura 12 Tecnologías implementadas en lechos fluidizados .....	25
Figura 13 Clasificación y comportamiento de partículas .....	26
Figura 14 Gráfico velocidad (m/s) vs caída de presión (mbar) en un lecho fluidizado .....	28
Figura 15 Secador de lecho fluidizado UDEP .....	30
Figura 16 Curva de velocidad y caudal .....	31
Figura 17 Volumen ocupado por 5 kg de café .....	32
Figura 18 Tablero para prototipos .....	34
Figura 19 Café pergamino a utilizar .....	35
Figura 20 Velocidad de aire con blower a 60 Hz .....	35
Figura 21 Simulación de flujo de aire en prototipo .....	36
Figura 22 Medición en puntos del lecho del prototipo .....	36
Figura 23 Vista de fluidización en un solo lado .....	37
Figura 24 Diseño 1 de cámara .....	38
Figura 25 Diseño 2 de cámara .....	38
Figura 26 Diseño 3 de cámara .....	39
Figura 27 Diseño 4 de cámara .....	39
Figura 28 Codo para cambiar la dirección del flujo .....	39
Figura 29 Dispersión de flujo usando distribuidor .....	40

Figura 30 Secador de quinua .....	42
Figura 31 Secador de maíz .....	42
Figura 32 Idea de fluidización de granos de café .....	43
Figura 33 Toma de datos durante las pruebas.....	44
Figura 34 Vista de la fluidización de granos .....	45
Figura 35 Vista superior de la fluidización de 3 kg de café pergamino.....	45
Figura 36 Pruebas con estructura cónica .....	46
Figura 37 Vista superior de fluidización con estructura cónica .....	46
Figura 38 Prueba en geometría cónica pequeña .....	47
Figura 39 Geometría cónica con café fluidizando.....	48
Figura 40 Café pergamino utilizado .....	48
Figura 41 SolidWorks Flow Simulation.....	49
Figura 42 Condiciones de frontera.....	50
Figura 43 Ventana de evento solucionado.....	50
Figura 44 Simulación en prototipo UDEP .....	51
Figura 45 Simulación de la presión de aire .....	52
Figura 46 Simulación con lecho de perforaciones en línea.....	52
Figura 47 Simulación con lecho de perforaciones en círculo.....	53
Figura 48 Simulación con placa perforada a la salida del codo .....	54
Figura 49 Simulación con lecho hecho de malla .....	54
Figura 50 Reactor tipo cónico de 25° .....	55
Figura 51 Comportamiento del fluido reactor cónico a 25° .....	56
Figura 52 Reactor cónico a 30° .....	56
Figura 53 Simulaciones en reactor cónico a 30° .....	57
Figura 54 Simulación en reactor cónico a 20° .....	57
Figura 55 Cámara cilíndrica .....	58
Figura 56 Cámara con dos troncos de cono opuestos axialmente .....	59
Figura 57 Cámara con dos troncos de cono opuestos verticalmente.....	60
Figura 58 Inserción de álabe horizontal como deflector .....	60
Figura 59 Simulación usando álabe en posición inclinada como deflector .....	61

Figura 60 Inserción de deflector plano .....	61
Figura 61 Simulación usando deflector plano.....	62
Figura 62 Vista isométrica del secador propuesto.....	63
Figura 63 Simulaciones a la salida del reactor .....	64
Figura 64 Simulación ubicando resistencias eléctricas en la superficie lateral .....	65
Figura 65 Simulación usando resistencias eléctricas en el centro.....	65
Figura 66 Simulación con resistencias en espiral.....	66
Figura 67 Simulación con esferas.....	67
Figura 68 Vista superior de las corrientes de aire.....	67
Figura 69 Vista perpendicular al ingreso del codo.....	68
Figura 70 Flujo de aire en todo el secador.....	68
Figura 71 Perfil de velocidades en el lecho.....	69
Figura 72 Mapa de velocidades en el reactor.....	69
Figura 73 Secador dimensionado.....	71
Figura 74 Fluidización de 5 kg de café pergamino.....	72
Figura 75 Fluidización de 4 kg de café pergamino.....	73
Figura 76 Estudio paramétrico de flujo de velocidad.....	73
Figura 77 Flujo en el secador para 60, 55 y 50 Hz en el motor del soplador.....	74
Figura 78 Corrientes de aire en el secador para 50 y 45 Hz.....	74
Figura 79 Temperatura del fluido variando condición de frontera .....	75
Figura 80 Curvas de secado usando reactor cónico.....	75
Figura 81 Curvas de secado de café pergamino.....	77
Figura 82 Troncos de cono parte de la cámara de calentamiento .....	78
Figura 83 Resistencia eléctrica propuesta a utilizar.....	78
Figura 84 Vista general del ensamblaje .....	80

## Introducción

El café peruano incursionó en mercados extranjeros en 1997, de hecho, del análisis de datos desde 1995 durante 20 años se puede evidenciar que la producción aumentó en un factor de 2,2 veces. Para el 2016 se tenía 223 000 familias dedicadas al cultivo de estos granos y el prestigio ganado a nivel global hace que actualmente sea uno de los productos que fortalece la economía del país.

Se evidenció también, que los costos de producción pueden llegar a ser mayores que los ingresos por la venta de este producto en circunstancias comunes como la falta de recursos tecnológicos para el propio productor, obligándolo a que lo venda a algunas empresas certificadas y finalicen el proceso productivo como el de venta a mercados extranjeros con la calidad que estos exigen.

Parte de las deficiencias tecnológicas se ven reflejadas en el proceso de secado, pues se encontró que el 70% de las familias manejan sus cultivos de manera tradicional donde el secado se da a la intemperie y esto tarda de 12 a 15 días, donde se debe remover el café a cada hora y guardar de acuerdo con las condiciones climáticas.

Es en base a lo explicado que se busca brindar el diseño de un secador de lecho fluidizado, pues es uno de los avances tecnológicos en desarrollo que apuntan a solucionar el tema de secado uniforme con variables físicas controladas, como la velocidad de fluidización y temperatura del aire.

Durante el capítulo uno se resumen los aspectos generales en los que se basa la investigación, análogamente en el capítulo dos se detalla la información para diseñar mediante fórmulas y recomendaciones de fuentes bibliográficas. En el capítulo tres se muestran los estudios realizados en un secador instalado en la Universidad de Piura, para obtener un *feedback* del comportamiento, mientras que en el capítulo cuatro se harán las simulaciones de velocidad y temperatura del aire usando el diseño propuesto y en el capítulo cinco se brinda una vista general del diseño.

Finalmente se entregan los planos para la creación del secador, así como las recomendaciones que este implica junto a las conclusiones del trabajo de investigación.

## Capítulo 1

### Aspectos generales del café y lechos fluidizados

#### 1.1 Producción de café

El arbusto productor de granos de café es comúnmente llamado cafeto y científicamente *coffea arabica*, es proveniente de las mesetas de Etiopía donde se cultiva de 1,200 a 2,000 m.s.n.m. Esta planta necesita sombra y se adaptó para cultivarla en Asia, Sudamérica, Centroamérica y el Caribe, lugares donde las condiciones mostradas en la Tabla 1 llegan a coincidir.

**Tabla 1**

*Condiciones para las zonas de vida de un cafeto*

Parámetros	Condiciones óptimas	Condiciones manejables
Horas de sol	4,5 – 5,5	Menos de 4,5
Temperatura (°C)	17 – 23	Menos de 14 o más de 30
Precipitación (mm/año)	1.500 – 1.800	Menos de 1.500
Profundidad efectiva del suelo (cm)	Mayor de 45	Entre 30 y 45
Textura del suelo	Franco	Arcillo o arenoso
pH del suelo	5,0 – 6,0	4,5 a 6,5
Materia orgánica (%)	Mayor de 4	Entre 2 y 4
Fertilidad del suelo	Media – alta	Baja

*Nota.* Adaptado de Solidaridad South América (2017).

Para la producción de café es necesario realizar una planificación que va desde la selección de terreno hasta el sistema de agroforestería.

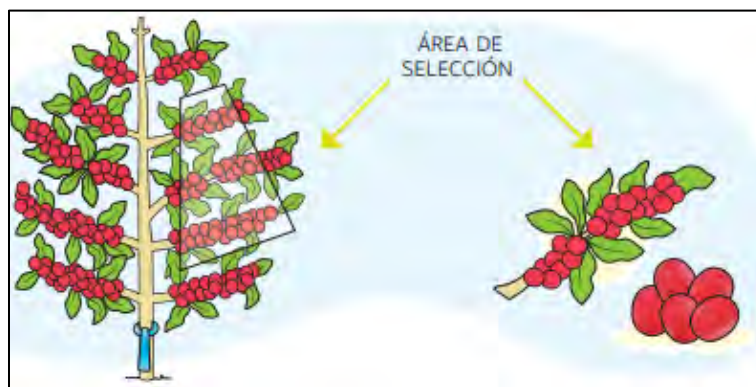
#### **1.1.1 Terreno para la instalación de cafetales**

Se hace un reconocimiento de la capa de tierra arable, el tipo de plantas que coexisten para tener un indicador de la fertilidad, los niveles e inclinación del terreno, la toma de muestras para descifrar mediante laboratorio los nutrientes disponibles, investigar las aplicaciones anteriores en el lugar, además de un estudio para programar un plan de sanidad ante las eventuales plagas.

El terreno debe cumplir con las condiciones tipificadas en la Tabla 1, además de que las familias productoras puedan instalar tecnologías que estén a su alcance, así como de disponer de recursos propios adherentes al terreno (Figura 1).

**Figura 1***Recursos ambientales y tecnológicos**Nota.* Adaptado de Solidaridad South América (2017).**1.1.2 Selección de semillas y plantaciones**

Sembrar café es hablar de un proyecto a largo plazo cuyas bases sientan en la elección de terreno y la semilla. En Perú se cultiva el café tipo arábica, 95% de la producción es exportado y el resto se queda en el mercado nacional o se exporta a países cercanos para reingresar con diferente marca. Los granos que serán destinados para semilla se cosechan según la Figura 2.

**Figura 2***Zona de elección de granos para semilla**Nota:* Adaptado de Solidaridad South América (2017).

Para la germinación de las semillas se prepara un volumen donde se agrega tierra fina de bosque sin previos cultivos y hojas de plantas. Los productores desinfectan esta tierra esparciendo agua caliente y exponiendo al sol tal volumen de tierra. Una vez listo el germinador se instalan las semillas sabiendo que el tallo emergerá dentro de 25 días. Estas plantas pasan al vivero después de 70 días en el germinador.

El vivero es una construcción tipo rústica de un techo, paredes expuestas a la ventilación constante y de área considerable. Aquí se acogen plantones en bolsas de 1 kg de tierra, donde fortalecerán sus raíces y se controlará para evitar la adquisición de plagas. El abono utilizado debe ser trabajado por días pues el abono fresco trae cargas virales que afectan la hoja o tallo de la planta.

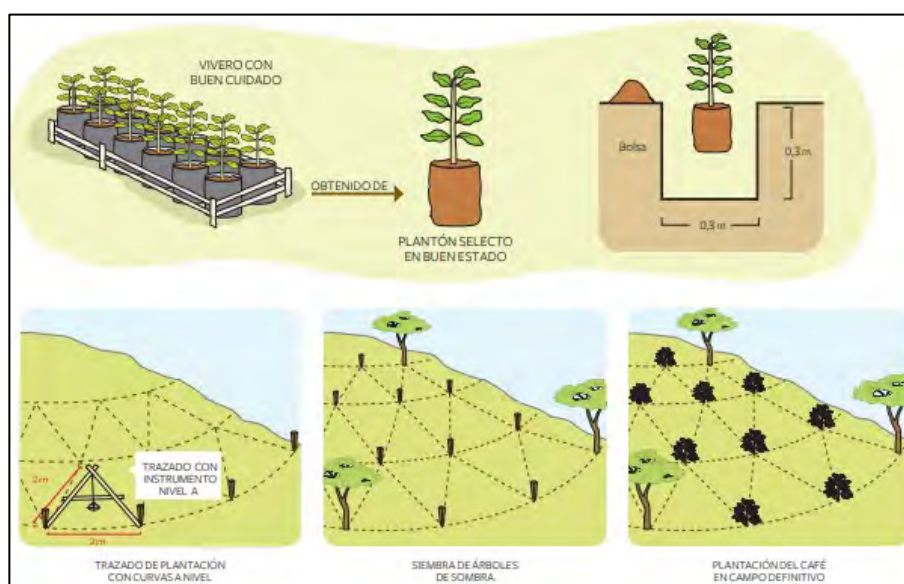
Es necesaria la exposición al sol, por lo que el techo de vivero puede ser diseñado con el objetivo de captar luz solar durante momentos del día. Además, se debe cercar y rociarle soluciones orgánicas caseras para que no se desarrolle una enfermedad conocida como la “chupadera”.

Las plantas que irán a campo después de la selección en el vivero pasan por un periodo de adaptación que dura cinco días. Se le ira retirando gradualmente de la sombra y aplicando soluciones foliares que aumentarán su porcentaje de prendimiento al terreno y otras que eviten el estrés de la planta después de su trasplante.

La siembra en terreno debe ser espaciada (Figura 3), ello varía según el productor y su experiencia. El abonamiento orgánico es con guano de islas, roca fosfórica u otra mezcla de micronutrientes y se da de manera continua. Un arbusto de cafeto bien cuidado estaría dando sus primeros frutos después de cuatro años.

**Figura 3**

*Plantaciones de cafeto*



*Nota:* Adaptado de Solidaridad South América (2017).

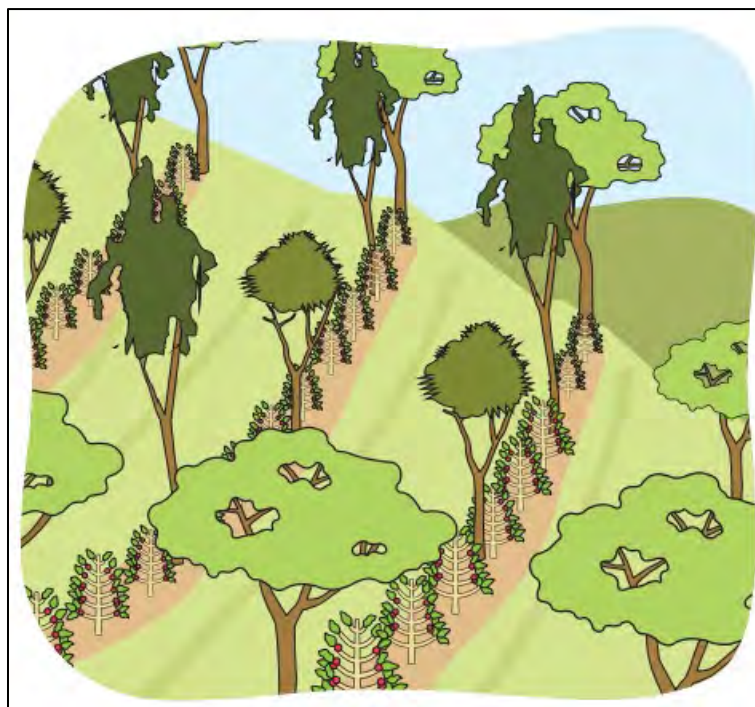
### **1.1.3 Sistema de agroforestería**

Esta estrategia tiene la finalidad de adaptar los cafetos a los cambios bruscos del clima a lo largo de los años sin afectar las horas de sol necesarias usando árboles altos (Figura 4). El

sistema resulta ventajoso, ya que se dará mejor uso de la tierra, el suelo será más fértil, los cafetales y animales tendrán sombra, además habrá producción de madera. En Jaén, por ejemplo, se usan árboles de palta, faique y guabas.

**Figura 4**

*Sistema de agroforestería*



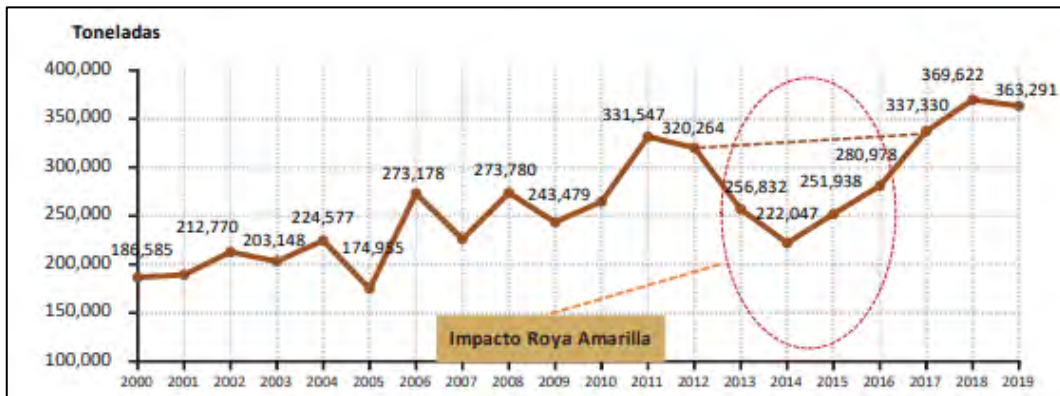
*Nota.* Adaptado de Solidaridad South América (2017).

#### **1.1.4 Cosecha de granos de café**

El proceso para llegar a cosechar granos de café lleva cuatro años a partir de la siembra en tierra. Durante este tiempo se debe implementar y trabajar el sistema de agroforestería, abonar de acuerdo con la calidad del café a entregar, prevenir la roya amarilla e ir implementando tecnologías en caso suceda un fenómeno climático.

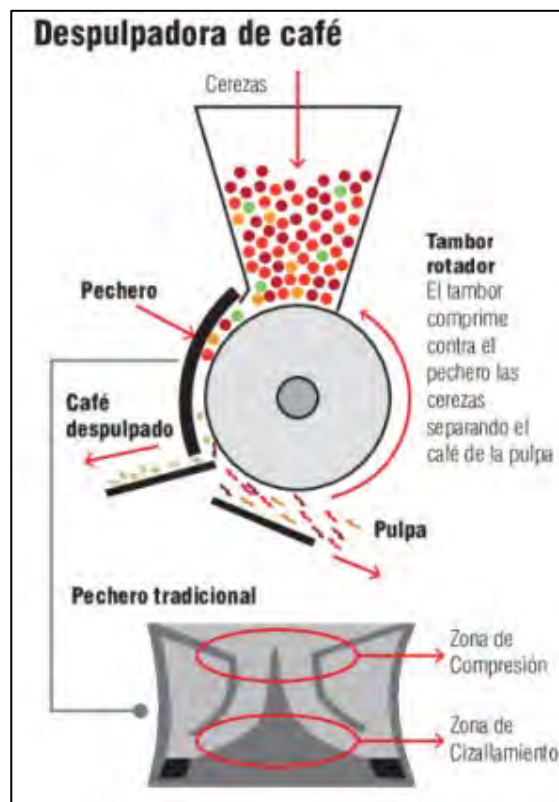
En la Figura 5 se rescata que la roya amarilla impactó durante cuatro años en la producción nacional del café. El estado peruano ha tenido que invertir 122 millones de dólares para recuperar la producción sembrando nuevos plantones, los cuales demoran cuatro años en producir, como se ha mencionado.

El caficultor realiza tres cosechas durante la época de maduración del fruto. Las fases de la cosecha son el rebusque, plena y raspa. Solo se recogen los granos cerezo de color rojo, los verdes pintones se van dejando para la siguiente pasada y los granos que estén sobre maduros se procesan aparte para que la calidad organoléptica de los maduros no se vea afectada.

**Figura 5***Producción nacional de café*

*Nota.* Adaptado de Ministerio de Agricultura y Riego (2020).

Terminada la cosecha, los granos que están en baya o cereza se deben “pelar”, y es donde los recursos tecnológicos del caficultor se hacen presente. Se usa la despulpadora (Figura 6), cuyo principio de funcionamiento se basa en comprimir las bayas con un tambor, que gira por acción manual usando una manivela o un motor de baja potencia.

**Figura 6***Funcionamiento de despulpadora*

*Nota.* Adaptado de La Patria (2023).

## 1.2 Humedad y métodos de secado

La acción de despulpar el café se ejecuta en las parcelas si es que se da la rotación con la manivela o en los hogares de los caficultores si se usa un motor que genere la rotación. De hecho, en 2018 el programa de reconversión productiva otorgó a 32 familias, a modo de beneficio, maquinas despulpadoras de café que incluían un motor eléctrico con el fin de facilitar el trabajo durante su primera cosecha (MINAGRI, 2018).

El resultado de ambos métodos es café con el mucílago, una membrana que envuelve el grano de café y representa un 22% del peso húmedo del grano (Orrego et al., 2012). Para retirarla es necesario dejar fermentar los granos 24 horas y luego lavarlo por cuatro ocasiones. Las aguas residuales deben pasar por métodos de filtrado para evitar la contaminación ambiental y se menciona que en el cuarto lavado los granos de café que flotan deben retirarse (Solidaridad South América, 2017, p. 120).

Luego, se tiene café humedecido por causa del lavado y propio de su naturaleza envuelto aún por el endocarpio o comúnmente conocido como pergamino. Este pasará por diversos métodos de secado que se puedan implementar en las parcelas u hogares del trabajador para que al fin se convierta en el beneficio que transa el productor (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2017, p. 39), pues para retirar el pergamino y separar por calidad se necesitan almacenes más sofisticados.

### 1.2.1 Humedad

La humedad de un producto hace referencia a la cantidad de agua que tiene este en su interior mediante una forma de agua libre que se evapora fácilmente y otra ligada a las partículas del producto, por lo cual necesariamente conlleva aplicar diferentes métodos de extraerla, así como un mayor tiempo de operación. Matemáticamente se expresa mediante la humedad (M) en base húmeda (bh) en la ecuación 1 o en base seca (bs) en la ecuación 2.

$$M_{bh} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (1)$$

$$M_{bs} = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

$$M_{bh} = \frac{M_{bs}}{1 + M_{bs}} \quad (3)$$

Donde:

- $m_a$ : masa de agua en el producto (kg).
- $m_s$ : masa del producto teóricamente seco (kg).

### 1.2.2 Métodos de secado de granos de café

El agua contenida en los granos de café aumenta la proliferación de microorganismos que provocaría la descomposición de este. El secar los alimentos es un método de conservación que se ha usado a lo largo de la historia. El proceso puede utilizar la energía solar como método natural o una implementación tecnológica para encaminar una corriente de aire con ciertas condiciones como método artificial (García & Mercedes, 2020, p. 39).

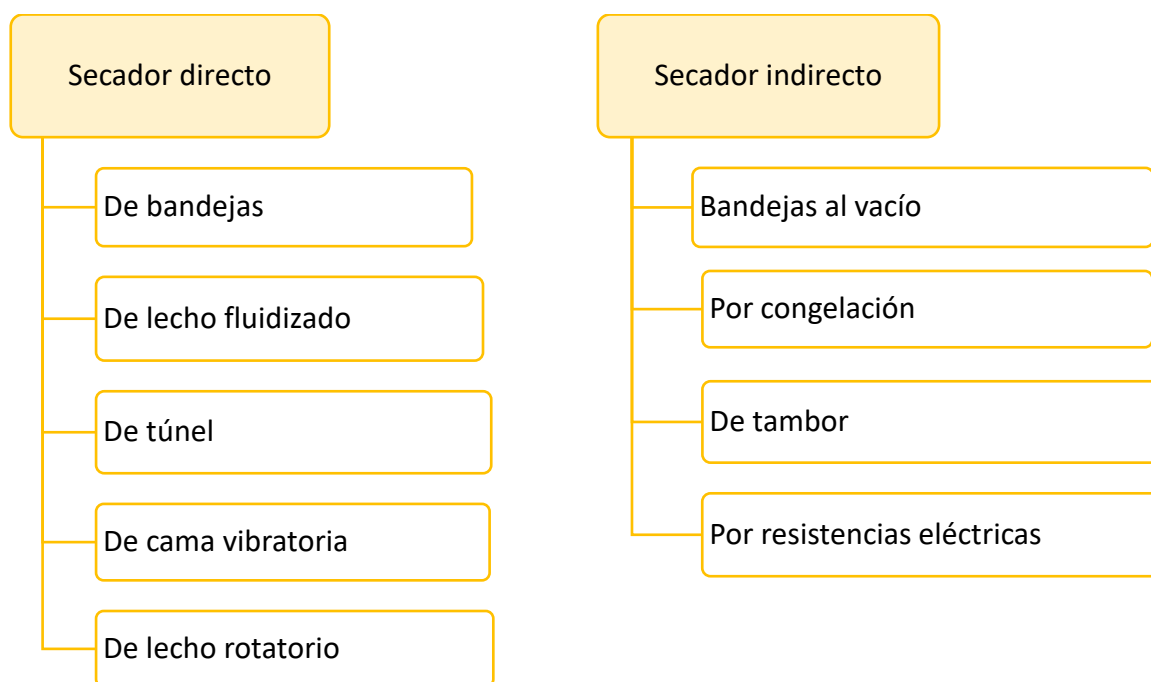
Naturalmente, existe una rama bastante avanzada de secadores solares (Lopez O. , 2023, p. 30). Estos han sido perfeccionados a medida que pasa el tiempo y su principio de funcionamiento se basa en usar la energía por convección que ofrece el sol.

Artificialmente, según (Jaramillo & Narváez, 2012, p. 42) los secadores se pueden clasificar mediante dos conjuntos: directos e indirectos. El primer tipo refiere a que el producto a secar tiene contacto directo con los gases usados para secarlos, los cuales han pasado una zona de calefacción e impulsión. El segundo conjunto transmite el calor al producto mediante conducción a través de paredes metálicas.

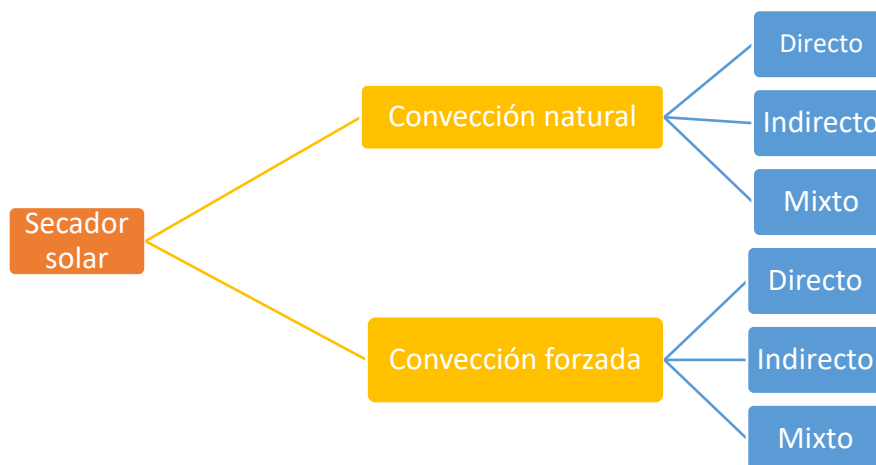
Usar un secador de cualquier conjunto implica que se ha evaluado el producto a secar, la cantidad y el costo que este conllevaría al usarlo. Para (Jaramillo & Narváez, 2012, p. 10) los métodos de secado artificial se resumen según la Figura 7, mientras que los secadores solares se clasifican según la Figura 8.

**Figura 7**

*Tipos de secadores*



*Nota.* Información organizada adaptada de Jaramillo & Narváez (2012).

**Figura 8***Secadores solares*

*Nota.* Extraído de López (2023).

### 1.3 Impacto económico del secado

La producción de café conlleva gastos anuales que se deben controlar de manera eficiente. A la par se debe ir estudiando y buscando los mejores precios que hay en el mercado en cuanto a oferta. El PNUD en su estudio de línea base del café en Perú logra concluir que el 55% del costo de producción es destinado a la mano de obra y que es necesario producir al menos 40 quintales por hectárea para tener ganancias.

Esta organización a la vez menciona que los caficultores no llegarían a obtener ganancia si es que pagarían constantemente la mano de obra. De ahí que las familias sean partícipes del proceso productivo. En la Figura 9 se resumió a detalle cómo es que se generan los costos de producción de café en una parcela de Puno. Es evidente que el caficultor se evita gastos produciendo su propio abono y ejecutando las labores agrícolas.

En la Figura 9 se puede observar que el secado consta de 10 jornales o días, tiempo en que la caficultora estima que el producto está seco y listo para venderlo. De hecho, científicamente la humedad debe estar en un rango de 10 a 12% (Solidaridad South América, 2017), pero al carecer de tecnologías la caficultora estima esto en base al color del grano y la dureza que tienen al ser presionados con las uñas o navajas.

El impacto económico del secado no implica necesariamente que pasado 10 a 15 días se tenga café pergamino seco de alta calidad, si no que durante este tiempo el caficultor debió haber estado esparciendo, moviendo y guardando el café en el secador solar que generalmente se usa. Se esparce para que el producto que quede abajo no genere acidez, se remueve para que la humedad vaya disminuyendo uniformemente y se guarda debido a las posibles lluvias que se den en la zona.

El café pergamino seco que obtenga pasado esos días dependerá del cuidado que se haya dado, de hecho, PNUD (2017) menciona que este producto se comercializa al barrer, sin ningún criterio de calidad y ello influye en el precio que se venda. Evitar ello costaría 10 jornales más por hectárea, como se evidencia en la Figura 9.

**Figura 9**

*Costos de producción de café en una hectárea*

Costos de producción para 1 ha de café orgánico en Puno					
Rendimiento café pergamino kg: 644		Mano de obra S/ 35,00		Rendimiento promedio por qq pergamino/ha: 14	
Actividad	Unidad	Cantidad	Costo unitario (S/)	Total	Porcentaje
<b>1. LABORES AGRÍCOLAS</b>				<b>2 135,00</b>	
Deshierbos	Jornal	40	35	1 400,00	<b>24,20</b>
Fertilización	Jornal	8	35	280,00	
Podas	Jornal	4	35	140,00	
Control de sombras	Jornal	6	35	210,00	
Control fitosanitario	Jornal	3	35	105,00	
<b>2. COSECHA</b>				<b>2 800,00</b>	
Cosecha de cerezas	Jornal	40	35	1 400,00	<b>31,74</b>
Despulpado y lavado	Jornal	20	35	700,00	
Secado	Jornal	10	35	350,00	
Selección y ensacado	Jornal	10	35	350,00	
<b>3. INSUMOS</b>				<b>1 340,00</b>	
Guano de isla	Saco	10	65	650,00	<b>15,19</b>
Roca fosfórica	Saco	1	50	50,00	
Sulfato de potasio	Saco	1	130	130,00	
Sulpomag	Saco	1	110	110,00	
Compost	Saco	20	20	400,00	
<b>4. OTROS GASTOS</b>				<b>2 546,36</b>	
Alquiler de tierra	Ha	1	500	850,00	<b>28,87</b>
Alquiler de mochila	Días	2	20	40,00	
Sacos arpilleros	Unidad	20	1,8	36,00	
Administración	Unidad qq	14	22,42	313,88	
Preembarque y proceso	Unidad qq	14	13,52	189,28	
Gastos de exportación	Unidad qq	14	17,45	244,30	
Certificaciones y asistencia técnica	Unidad qq	14	11,29	158,06	
Flete zona producción a Callao	Unidad qq	14	51,06	714,84	
<b>TOTAL</b>				<b>8 821,36</b>	
			<b>S/</b>		
<b>Análisis Económico</b>	Precio promedio por kg. (S/)		<b>13,70</b>	Nota. Precio promedio en función de US\$190 qq FTO exportación x75% rendimiento Pergamino S/ 450.  Flete considerado por la revista Comex de US\$0,37 kg.  Central de Cooperativas de los Valles de Sandia Ltda. (CECOVASA).	
	Rendimiento qq (46 kg/ha)		<b>14,00</b>		
	Precio venta promedio (S/qq)		<b>450,00</b>		
	Ingreso bruto (S/)		<b>6 300,00</b>		
	Costo producción/ha		<b>8 821,36</b>		
	Costo producción/qq		<b>630,10</b>		
	<b>Utilidad neta (S/)</b>		<b>-2 521,36</b>		

Nota. Extraído de PNUD (2017).

#### 1.4 Teoría de fluidización

La fluidización es un concepto que históricamente apareció en 1926, pero su primera aplicación industrial sucedió en 1942 en el proceso de refinación de petróleo llamado craqueo catalítico. De ahí los experimentos y teorías acerca de este tema han surgido en innumerables

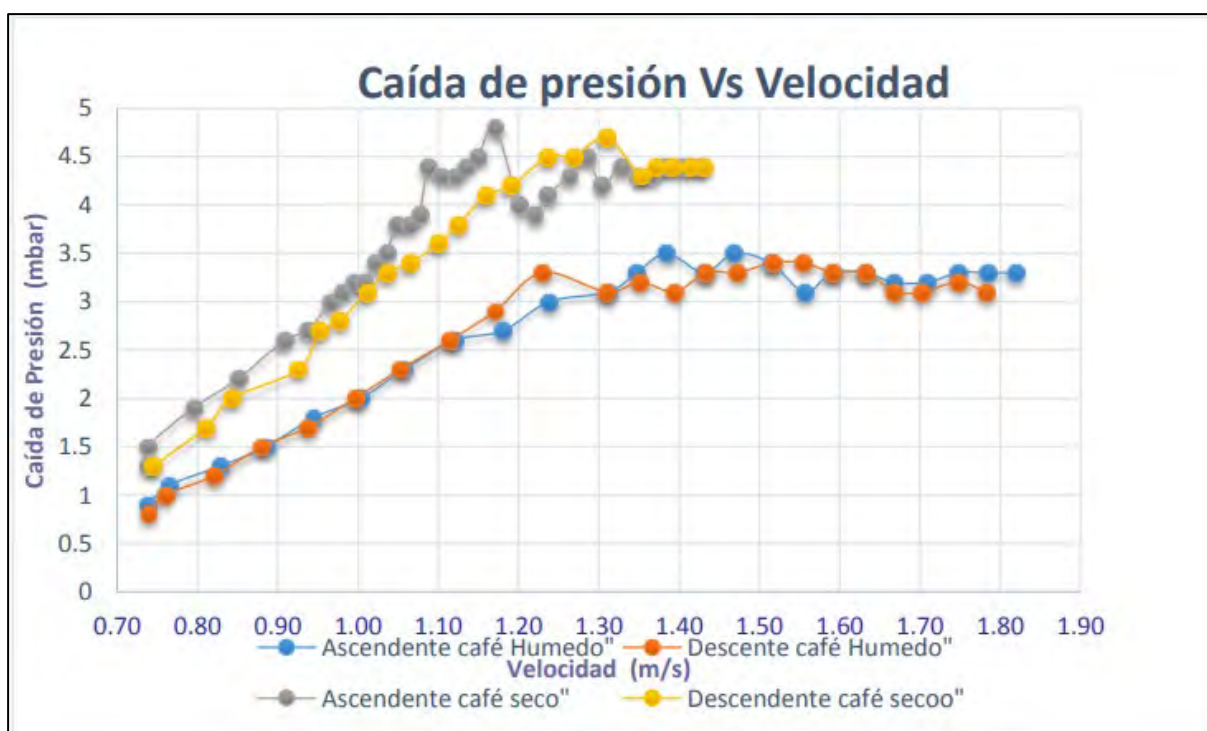
cantidades, algunos fueron de apoyo para el desarrollo de la ciencia mientras que otros han fracasado. Además, varios experimentos se desarrollaron a pequeña escala y cuando se extrapolan los resultados, las teorías varían significativamente (De Prada, 2014, p. 5).

De Prada (2014) dice que “la fluidización es el fenómeno por el cual se consigue que un lecho de partículas sólidas se suspenda en el seno de un gas líquido al hacerlo pasar entre ellas, adquiriendo un comportamiento semejante al de un fluido” (p. 4).

Un complemento a ello es que cuando el fluido pasa hacia arriba a través de un lecho de partículas, la pérdida de presión en el fluido debido a la resistencia por fricción aumenta a medida que aumenta el flujo del fluido (Poornachandra et al., 2021). Adicional a ello (González, 2014, p. 103) comprueba en su tesis lo que la teoría dice acerca de que la caída de presión será constante (Figura 10) una vez que una masa considerable de los granos comienza a fluidizar.

**Figura 10**

*Caída de presión vs velocidad en la fluidización*



*Nota.* Adaptado de Gonzales (2014).

#### **1.4.1 Lechos fluidizados**

La estructura por la cual una corriente de aire llega hacia un tubo vertical que en su base tiene una malla o cama agujereada que sostiene sólidos se llama lecho fluidizado y tiene diferentes comportamientos a medida que aumenta la velocidad del flujo del fluido.

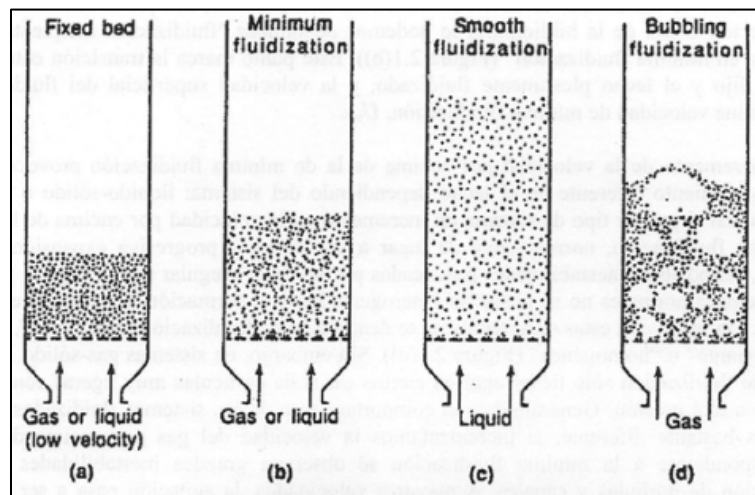
El lecho fijo es aquel estado donde las partículas sólidas permanecen en su posición cuando el aire pasa entre ellas. A medida que aumenta la velocidad del fluido se va generando una ligera vibración y ocasiona que se muevan de forma independiente (Figura 11-a).

Cuando el peso de las partículas se equilibra con el empuje que ejerce el fluido sobre estas, el estado se denomina “lecho en mínima fluidización”. En este estado se da la transición de un lecho fijo hacia un lecho fluidizado plenamente (Figura 11-b). Se puede representar la velocidad del flujo del fluido en ese punto ( $U_{mf}$ ), según la ecuación 4 (De Prada, 2014).

Incrementar la velocidad del flujo cuando se está en el estado de mínima fluidización expandirá el lecho de manera homogénea, si el fluido es líquido (Figura 11-c), mientras que cuando la fluidización se da como sólido gas, existirán burbujas en el lecho que le dan un comportamiento heterogéneo, más aún si las partículas son ligeras (Figura 11-d).

**Figura 11**

*Estados de lechos*



*Nota.* Adaptado de De Prada (2014).

$$U_{mf} = 0.00137 \frac{(\rho_s - \rho)gd^2}{\mu} \quad (4)$$

Donde:

- $\rho_s$ : densidad de los granos de café.
- $\rho$ : densidad del fluido.
- $g$ : gravedad.
- $d$ : diámetro equivalente, hallado experimentalmente.
- $\mu$ : viscosidad dinámica del fluido.

### 1.5 Análisis termodinámico en lechos fluidizados

Los lechos fluidizados se dan en una columna vertical y el objetivo es secar material particulado sólido. La velocidad de secado depende del ritmo de transferencia de calor y masa, ambos tienen indicadores para determinar el rendimiento termodinámico del sistema (Prasanta et al., 2022, p. 6).

Transferir calor es transferir energía y según Prasanta et. al (2022) un indicador de este proceso se evidencia ecuación 5, que representa la eficiencia del lecho fluidizado ( $fbd$ ). Será necesario contar con las entalpías específicas del aire a la entrada y salida del lecho.

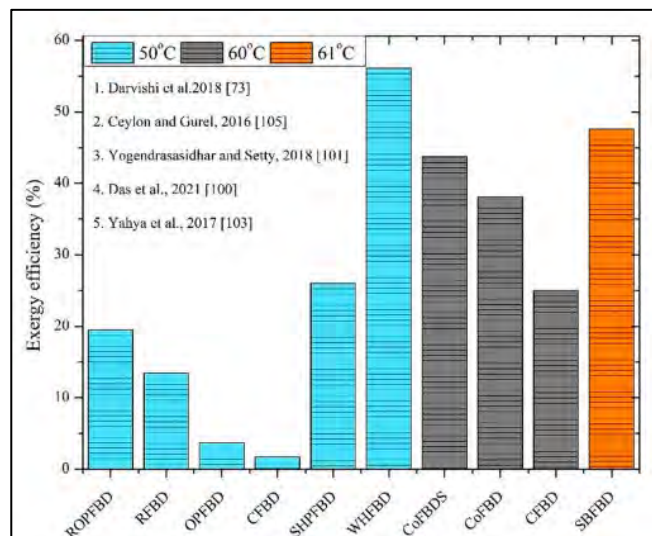
$$\eta_e = \frac{(h_{fbd,i} - h_{fbd,o})}{h_{fbd,i}} \quad (5)$$

El análisis de exergía es una evaluación un tanto más realista que el análisis energético, este indicador es menor que la eficiencia energética debido a las destrucciones de exergía y las pérdidas por escape del calor. El indicador brinda un alcance para mejorar la eficiencia del sistema utilizado y se puede obtener como la relación entre la tasa de exergía a la salida y la tasa de exergía al ingreso de un lecho fluidizado (Prasanta et al., 2022, p. 11).

Son varias las tecnologías implementadas para aumentar la eficiencia exergética. En la Figura 12 se puede comparar la eficiencia para los lechos fluidizados convencionales o cilíndricos (CFBD) con los cónicos de 10° (CoFBDS). Se obtiene que la eficiencia exergética del segundo en mención es mayor. Adicional a ello, la tecnología que usa una pared de calor (WHFBDS) es la que mayor eficiencia exergética tiene, sin embargo, es un sistema complejo.

**Figura 12**

*Tecnologías implementadas en lechos fluidizados*



Nota: Adaptado de Prasanta et. al (2022).

## Capítulo 2

### Teoría para el diseño de secador y calentamiento de aire

#### 2.1 Características físicas del café

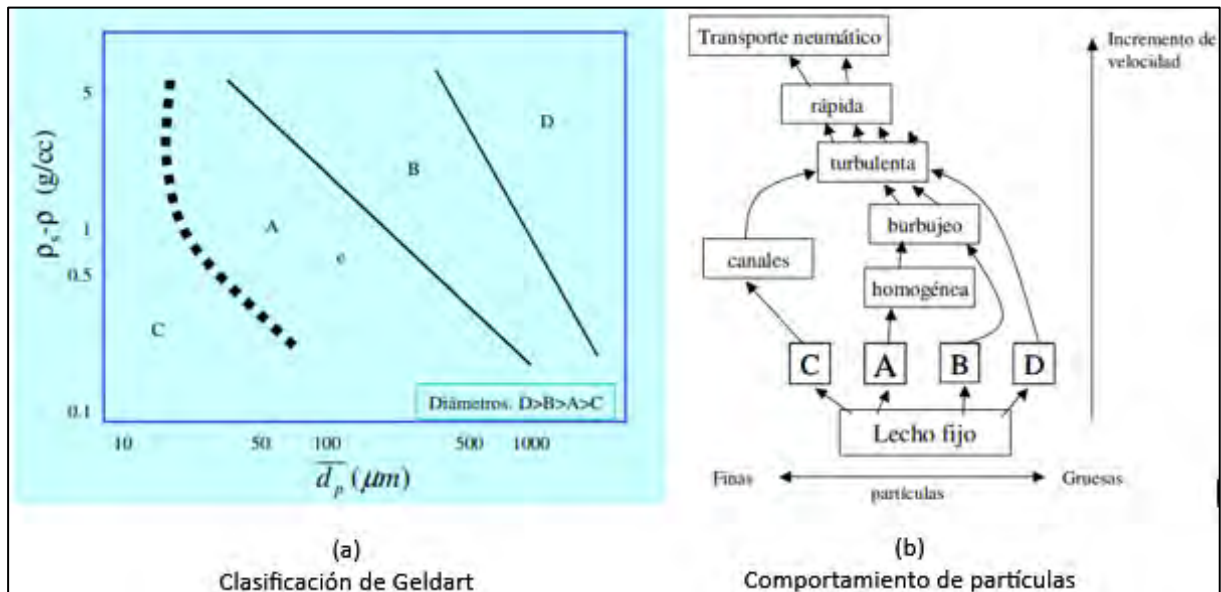
Obtener la ecuación 4 es una simplificación y asumir varios parámetros, uno de ellos el número de Reynolds. Este valor puede calcularse matemáticamente considerando valores de las propiedades físicas que tienen los granos, incluyendo al café. A la vez la  $u_{mf}$  llega a depender de la porosidad existente en el volumen de granos a fluidizar (Jaramillo & Narváez, 2012, p. 46). Se detallarán los conceptos de estas características y se referenciarán los valores.

##### 2.1.1 Clasificación según Geldart

Según la Figura 11 el lecho fluidizado tiene estados dependientes de la velocidad del flujo del fluido y pueden variar también por la forma geométrica del grano. Para Conesa (2010) fluidizar partículas de diámetro pequeño es pasar de un lecho fijo a un homogéneo y luego a un burbujear, mientras que para partículas de diámetro mediano se pasa del lecho fijo al burbujear apenas se sobrepase la  $u_{mf}$  (p. 8).

Figura 13

Clasificación y comportamiento de partículas



Nota. Adaptado de Conesa (2010).

Para diferenciar las partículas según su diámetro se utiliza la clasificación de Geldart (Figura 13-a). A la vez en la referencia "b" se ven organizados los estados del lecho para las diferentes partículas clasificadas. Lo ideal de un secador es dar con una velocidad que genere la fluidización de manera turbulenta y evitar el arrastre neumático, el café está clasificado según el tipo A, ya que su densidad es menor a  $1400 \frac{kg}{m^3}$  (Montilla et al, 2008).

### 2.1.2 Diámetro equivalente

La ecuación 4 surge de la igualdad entre la ecuación de Ergum y la caída de presión al pasar de un lecho fijo a uno fluidizado. Varios estudios encuentran que la porosidad ( $\varepsilon_0$ ) de los granos de café está entre 0.4 y 0.5 (De Prada, 2014, p. 29). Entonces, se obtiene una ecuación cuadrática cuya variable es la velocidad de mínima fluidización, pero se sabe también que el número de Reynolds es pequeño en ese instante y se puede despreciar el término que tiene esa variable cuadrática.

Es así como toda la igualdad se puede resumir a una ecuación lineal que depende de la densidad y diámetro equivalente de los granos de café pergamino, además de las propiedades del aire.

El diámetro equivalente del café pergamino se referencia de (Montilla et al., 2008, p. 5) con un valor de 8.55 milímetros. La densidad aparente se referencia en Montilla et al. (2008) como 391 kg/m<sup>3</sup> mientras que en (Lopez C. , 2021) se referencia como 406.50 kg/m<sup>3</sup>.

En la Tabla 2 se resume los valores que se utilizarán para reemplazar en la ecuación 4 y obtener la velocidad mínima de fluidización. Asimismo, valores de las propiedades físicas del aire a una temperatura media de 50 °C, recordando que al reactor ingresará aire caliente.

**Tabla 2**

*Valores de propiedades físicas a utilizar*

Propiedad física	Valor	Referencia
Diámetro equivalente	$D_e = 8.55 \text{ mm}$	(Montilla et al., 2008, p. 5)
Densidad de los granos	$\rho_s = 391.44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	(Montilla et al., 2008, p. 5)
Densidad del aire a 50 °C	$\rho = 1.092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	(Cengel & Cimbala, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 2006, págs. Tabla A-9)
Viscosidad dinámica del aire a 50 °C	$\mu = 1.963 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	(Cengel & Cimbala, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 2006)

*Nota.* Valores extraídos de Montilla et al. (2008) y Congela & Cimbala (2006).

### 2.2 Velocidades relacionadas a la fluidización

Para ciertos casos será necesario conocer el concepto de velocidades propias de un sistema de lecho fluidizado.

### 2.2.1 Velocidad superficial

Es la relación entre la velocidad del gas a utilizar y el área transversal por donde esté circulando (Unigarro, 2017). A medida que el área aumenta, esta velocidad disminuye y no necesariamente es uniforme en toda la superficie. Se puede obtener matemáticamente según la ecuación 6.

$$U_0 = \frac{Q}{A_t} \quad (6)$$

Donde:

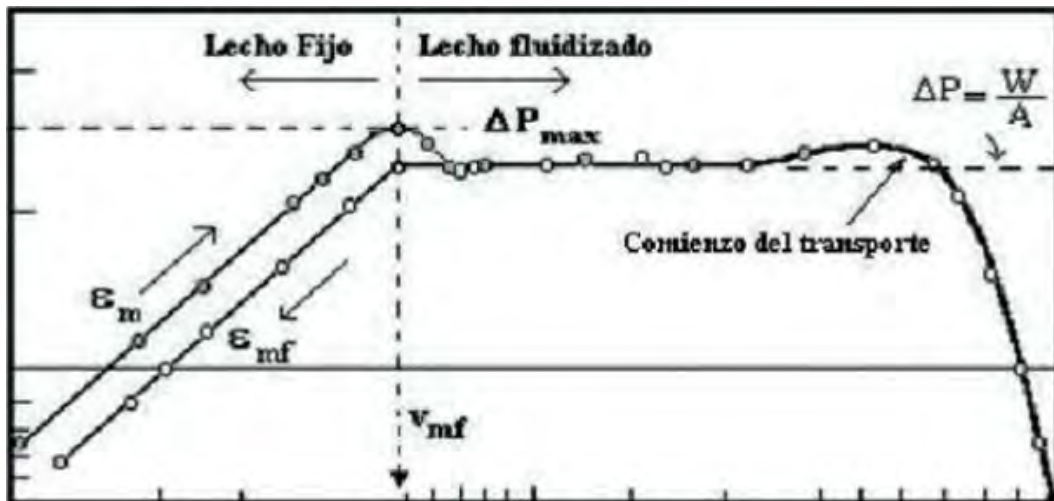
- $U_0$ : velocidad superficial del gas
- $Q$ : caudal del gas
- $A_t$ : área transversal por donde circula el gas

### 2.2.2 Velocidad de mínima fluidización

Como se ha mencionado, es la velocidad instantánea cuando se pasa del lecho fijo al ligeramente fluidizado. Esta velocidad se puede constatar cuando las partículas o algunas de ellas comienzan a “flotar”. Teniendo un gráfico velocidad contra caída de presión, esta velocidad se puede constatar en el punto en que la caída de presión deja de aumentar para disminuir levemente y mantenerse constante (Figura 14).

**Figura 14**

*Gráfico velocidad (m/s) vs caída de presión (mbar) en un lecho fluidizado*



*Nota.* Adaptado de Unigarro (2017).

### 2.2.3 Velocidad terminal

Velocidad con la que las partículas están en el límite de abandonar el reactor o cámara, donde la velocidad superficial ha superado la de mínima fluidización y se está produciendo el fenómeno. El dato se puede encontrar experimentalmente cuando la velocidad del gas

comienza a arrastrar granos de café hacia la salida o según la ecuación 2.2 (Jaramillo & Narváez, 2012, p. 46).

Para diseñar el secador es necesario que la velocidad de operación para fluidizar esté entre la velocidad de mínima fluidización y la terminal (CONICET, 2013). Se hace con el fin de prever el arrastre de granos, cuando la velocidad superficial se vaya en una sola dirección y por tanto aumente su valor drásticamente.

$$U_t = \frac{2.32 * U_{mf}}{\varepsilon^2} \quad (7)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : porosidad del volumen de granos. Valor entre 0.4 y 0.5.
- $U_{mf}$ : velocidad de mínima fluidización.

#### 2.2.4 Comparación de trabajos relacionados a la fluidización

En la Tabla 3 se muestra el resumen de dos trabajos de investigación relacionados al secado de granos. En ambos casos la  $U_{mf}$  calculada es mucho menor a la hallada experimentalmente. Cabe mencionar que los motores usados cuentan con variador de frecuencia y los datos resumidos de la  $U_{mf}$  experimental son a 60 Hz.

**Tabla 3**

*Resumen de trabajos con secadores de lecho fluidizado cilíndricos*

Fuente- Grano	Masa	$U_{mf}$ teórica	$U_{mf}$ exper.	Característica
(Jaramillo & Narváez, 2012, p. 149) - maíz	2 kg	1.59 m/s	9 m/s	Reactor de 15 cm de diámetro
(Cabanillas & Rodas, 2023, pág. 60) - café	2.5 kg	1.19	5.2 m/s	Reactor de 21 cm de diámetro

*Nota.* Adaptado de Jaramillo & Narváez (2012) y Cabanillas & Rodas (2023).

Se puede ir concluyendo que la velocidad para empezar a fluidizar varía de acuerdo con la masa del producto y de alguna forma u otra con el diseño del secador. Además, en la exposición de Jaramillo & Narváez (2012) se nota que la fluidización es por zonas, no hay un flujo ascendente constante. Asimismo, Cabanillas & Rodas (2023) evaluaron el inicio de la fluidización y los granos de café ascendían en la parte lateral del lecho, no uniformemente.

### 2.3 Estudio de las dimensiones para el diseño del secador

Un secador de lecho fluidizado está conformado por tres equipos: el soplador, la estructura por donde circulará el aire, así como donde se dará la fluidización y las resistencias eléctricas, que se ubicarán en una cámara aparte de la estructura. Para afinar las dimensiones del secador a proponer se trabajó con un prototipo (Figura 15) ubicado en la Universidad de Piura (UDEP), parte de la tesis de Cabanillas & Rodas (2023).

**Figura 15**

*Secador de lecho fluidizado UDEP*



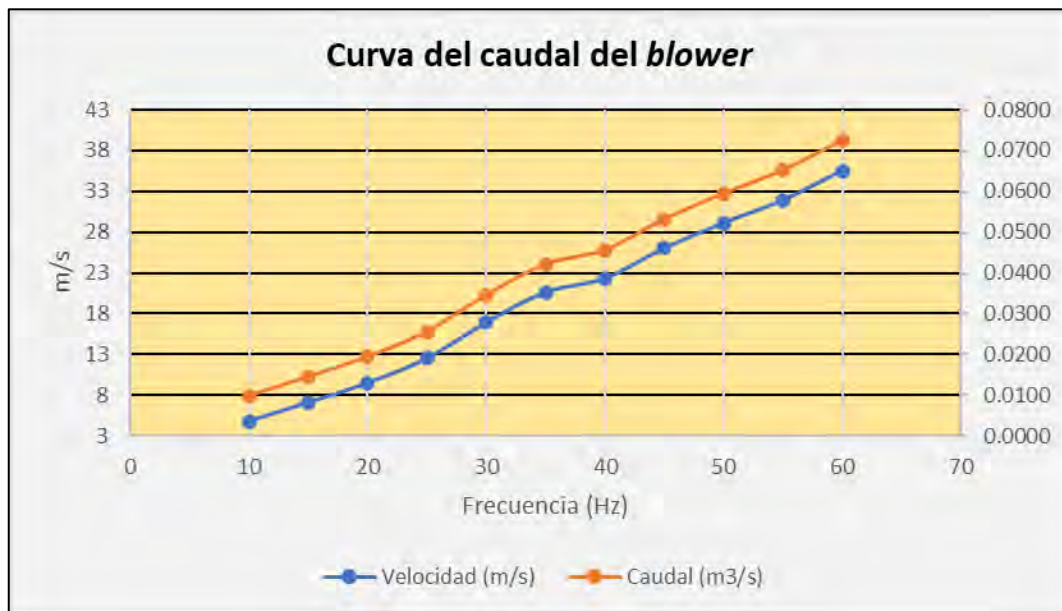
#### 2.3.1 Soplador

En cuanto al diseño del soplador es necesario encontrar el caudal de aire que se va a suministrar al sistema, luego en las curvas de trabajo de estos equipos se relaciona con la potencia y así se puede comprar el adecuado.

Para la presente tesis se trabajará con un equipo propiedad del prototipo (Figura 15) y lo que se ha hecho es evaluar su comportamiento cuando se varía la frecuencia. Tiene instalado el variador y conociendo el diámetro del tubo de salida se obtuvieron datos que se resumen en la Tabla 4 y la Figura 16.

**Tabla 4***Estudio del blower a utilizar*

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
10	4.8	0.0098	35.30
15	7.1	0.0145	52.21
20	9.5	0.0194	69.86
25	12.5	0.0255	91.93
30	16.9	0.0345	124.29
35	20.6	0.0421	151.50
40	22.3	0.0456	164.00
45	26.0	0.0531	191.21
50	29.1	0.0594	214.01
55	31.9	0.0652	234.60
60	35.5	0.0725	261.07

**Figura 16***Curva de velocidad y caudal*

### 2.3.2 Estructura

Para diseñar esta parte se debe considerar que el *blower* tiene salida horizontal y el aire que expulsa debe dirigirse en forma vertical hacia la parte donde reposan los granos de café, a la que se llamará reactor.

En cuanto al prototipo, se conoció que el diámetro del tubo de salida es de 2 pulgadas, 50 cm de largo y conecta con un codo por medio de bridas. Se consigue cambiar de dirección al flujo para que llegue a una zona cónica donde se pretende expandir el aire y encontrarse con el lecho de 21 cm de diámetro. Finalmente tiene un reactor de 1 metro de alto con salida a 90 cm desde el lecho.

En base a la velocidad mínima de fluidización encontrada y el caudal que ingresa a los 60 Hz del *blower* se podrá calcular el diámetro del lecho (ecuación 6). Aparte, el objetivo del presente trabajo es lograr fluidizar 5 kg de café tipo pergamino, traído de Canchaque para realizar pruebas. En la Figura 17 se observa la altura que ocupa esta masa usando el reactor cilíndrico, de ahí el volumen puede ser calculado y considerarlo en el diseño a proponer.

**Figura 17**

*Volumen ocupado por 5 kg de café*



### **2.3.3 Cámara de calentamiento**

Será un volumen cuyas dimensiones serán diseñadas para albergar resistencias eléctricas y que a la vez la velocidad del flujo sea recuperada a su salida. Según el prototipo se

tiene la limitación de que la cámara no puede ir en la parte externa del *blower* por su propio sistema de absorción de aire, entonces la cámara se ubicará después de este y antes del reactor. Esta parte de la estructura debe llevar una cubierta de material refractario, para acercarlo a un sistema adiabático.

#### 2.4 Cálculo de potencia para elevar la temperatura del aire

Las resistencias eléctricas en el mercado industrial se definen por su potencia entregada, así que para saber cuántas de ellas se van a utilizar es necesario hallar el calor total necesario para elevar la temperatura del aire hasta un límite propuesto. Por el trabajo en el *blower* durante unos días se conoció que la temperatura del aire a su salida era cercana a 30 °C y en base a bibliografía se acordó llevarle a un máximo de 70 °C.

El sistema en la cámara se considerará adiabático y para ello es necesario una capa de material refractario más aislamiento en la zona. Entonces, el cálculo de la potencia necesaria para calentar el aire en el sistema se da según la ecuación 8.

$$P_e = Q * C_p * (T_f - T_0) \quad (8)$$

Donde:

- $P_e$ : Potencia eléctrica por suministrar (kW).
- $Q$ : Caudal de aire que ingresa a la cámara (m<sup>3</sup>/s) a 60 Hz.
- $C_p$ : Capacidad calorífica del aire (kJ/kg\*°C).
- $T$ : Temperaturas al salir (f) e ingresar (0) a la cámara (°C).

Teniendo un tubo a la salida del *blower* de 2" de diámetro el caudal es de 0.07 m<sup>3</sup>/s según la Tabla 4. El valor de la capacidad calorífica del aire según Jaramillo & Narváez (2012) como 1.214 kJ/kg\*°C se asume cuando el aire se usaría como medio de transferencia de calor. Por último, la temperatura máxima de salida se espera que sea de 70 °C.

Reemplazando esos datos en la ecuación 2.3 se obtiene que la potencia a entregar para el calentamiento de aire será de 3.40 kW. Para encontrar la longitud adecuada de la cámara será necesario simular la operación en el programa *SolidWorks*.

## Capítulo 3

### Experimentación de la fluidización

#### 3.1 Características del secador a utilizar

En la Universidad de Piura se tiene un módulo de trabajo que cuenta con instrumentación (Figura 15) Cabanillas & Rodas (2023) para estudiar la velocidad mínima de fluidización para distintas masas de café en baya.

Se utiliza este prototipo con la finalidad de evaluar ventajas y desventajas de operación para considerarlas en el nuevo diseño. Para ello fue necesario utilizar café pergamino a 56% de humedad (Figura 19) de la ciudad de Canchaque de la región Piura, un anemómetro, balanza, mallas que simule un lecho, silicona y herramientas.

**Figura 18**

*Tablero para prototipos*



Para controlar el soplador existe un programa propiedad del proyecto anterior, el cual fue compartido con el presente trabajo. A la vez, este contaba con un anemómetro digital que formaba parte del sistema y se pueden registrar sus valores. En la Figura 20 se puede observar que está instalado en un área considerablemente expandida ( $0.036 \text{ m}^2$ ), por lo que el dato a mostrar no necesariamente será el de la mayor velocidad que se pueda obtener.

Según la Tabla 4 el caudal a 60 Hz es de  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ , por tanto, la velocidad que teóricamente debe circular por toda el área circundante al anemómetro digital debe ser de aproximadamente  $2 \text{ m/s}$ , pero según la Figura 20 tal valor es de  $1.6 \text{ m/s}$ . Eso conllevó a construir tal parte en *SolidWorks* para observar cómo se comportaría la corriente de aire durante una expansión de área (Figura 21).

**Figura 19**

*Café pergamino a utilizar*



Se rescata que el flujo de aire, en su mayoría, está circulando pegado a la superficie lateral y no se genera una expansión del flujo como se creía teóricamente, por ello es por lo que el sensor de velocidad arroja un dato que llega a circular a través de él. No se puede afirmar en qué lado de la superficie lateral está circulando el flujo, entonces se dejó funcionando el *blower* y se midió ahora la velocidad en cuatro puntos del lecho del prototipo.

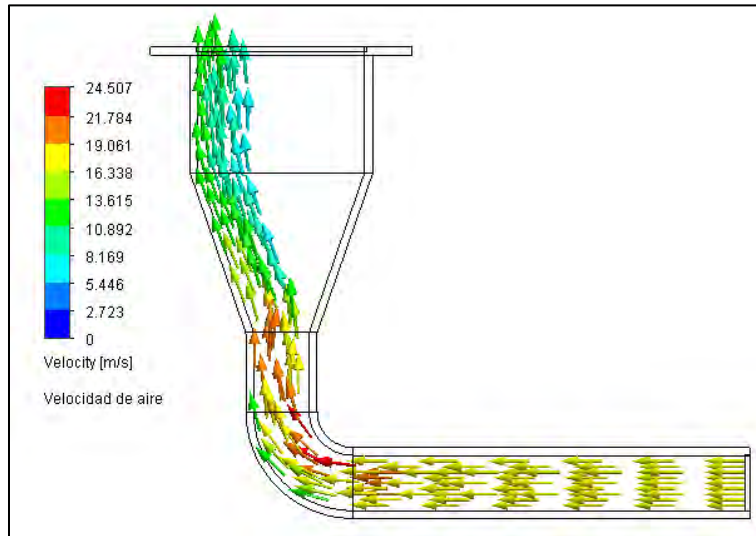
**Figura 20**

*Velocidad de aire con blower a 60 Hz*



**Figura 21**

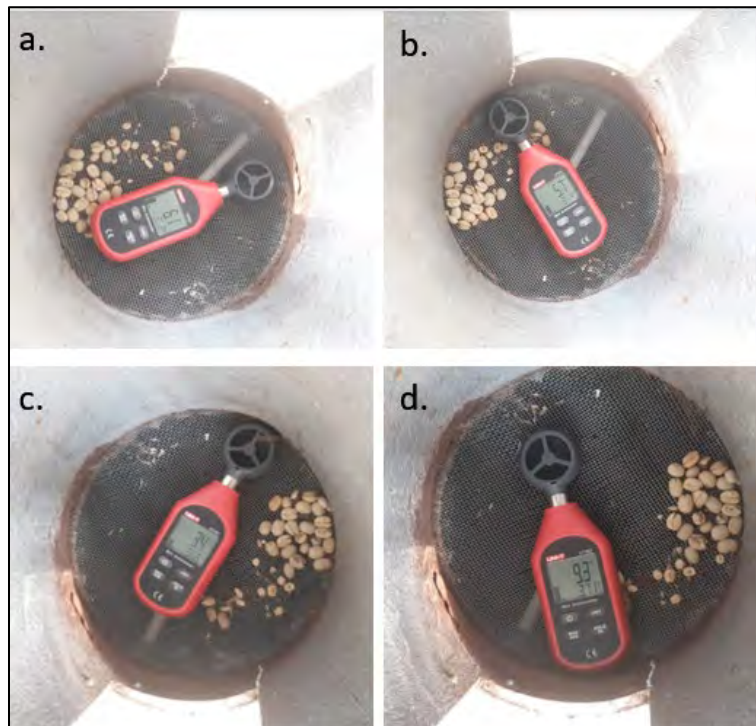
*Simulación de flujo de aire en prototipo*



Se observa en la Figura 22 que las cuatro capturas tienen medidas diferentes de velocidad, por lo que se puede ir rescatando que al expandir el área para “desarrollar” flujo se está generando un desorden de las velocidades sobre el lecho, de ahí que la fluidización se dé por un lado solamente y si el diámetro es relativamente grande, algunos granos no fluidizarán.

**Figura 22**

*Medición en puntos del lecho del prototipo*



Se realizó una prueba con 500 gramos de café para comprobar lo antes mencionado, y ciertamente, en el lecho (superficie donde reposan los granos de café) del reactor cilíndrico el flujo de aire no empujaba en una sola zona de la superficie lateral, pues por momentos estaba en un lado y luego en otro. Puede decirse que al frente del visor acrílico se movían con mayor intensidad los granos.

### Figura 23

*Vista de fluidización en un solo lado*



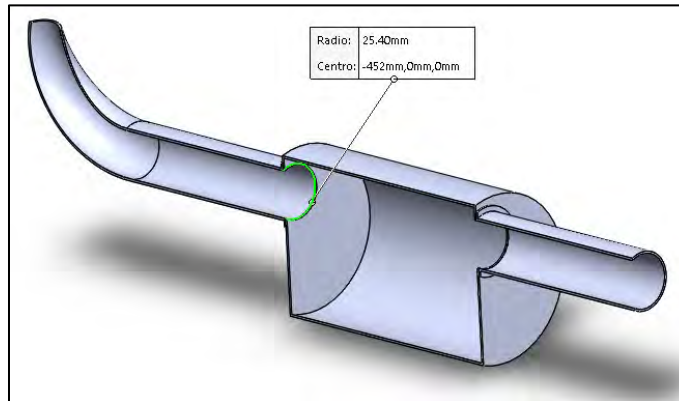
### 3.2 Estudio de la distancia y geometría donde se desarrolla el flujo de aire

Se han tomado datos de la velocidad del flujo de aire a 40 cm después de la salida del *blower*, que es la medida usada por el proyecto anterior al crear el prototipo. Mediante las simulaciones, esta velocidad parece constante por el propio hecho de que el tubo es de 2", es decir, mientras más reducido sea el diámetro, el flujo de aire será más concentrado y la velocidad uniforme en toda la sección.

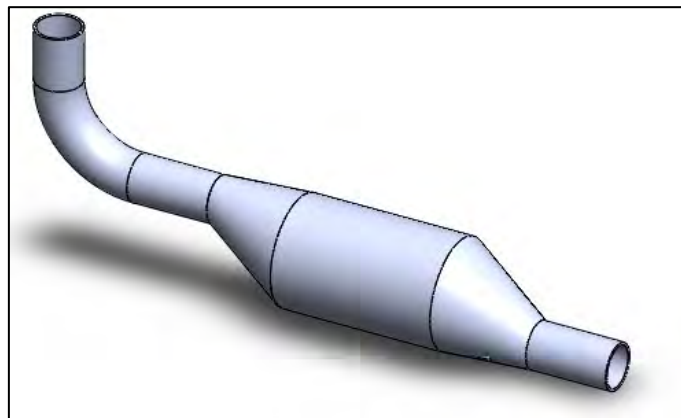
Se ha decidido mantener una distancia de tubería de 20 cm después de la salida del *blower*, suficiente para el desarrollo del flujo. Después, se diseña la cámara de calentamiento, donde el diámetro debe ser acorde a las resistencias eléctricas que se usarían. Durante el momento no se tenía idea clara de cual resistencia utilizar, se dejó una norma de que la cámara debía ser de 6 pulgadas de diámetro y lo que se utilice debía adaptarse a ello.

Los diseños de la cámara propuestos se evidencian desde la Figura 24 a la 27, las cuales serán llevadas a la parte de simulación de flujo en *SolidWorks*. La dimensión en cuanto a longitud de esta cámara tendrá mejor definición cuando se simule el calentamiento de aire.

La Figura 24 consta de una cámara cilíndrica en su totalidad, donde el aire empujado por el *blower* (parte derecha) ingresará, se expandirá y al pasar por resistencias eléctricas, en el interior, el aire saldrá caliente por una tubería del mismo diámetro con la finalidad de recuperar la velocidad inicial.

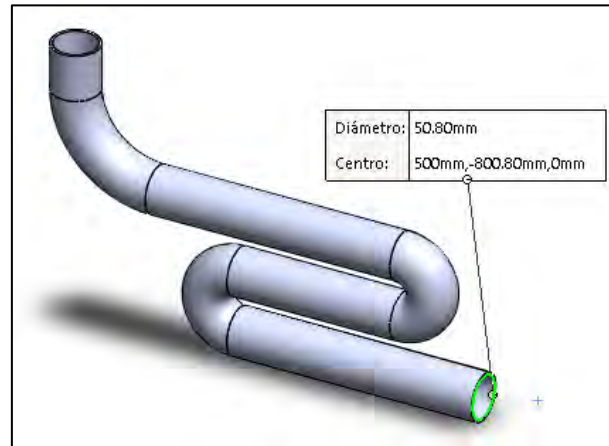
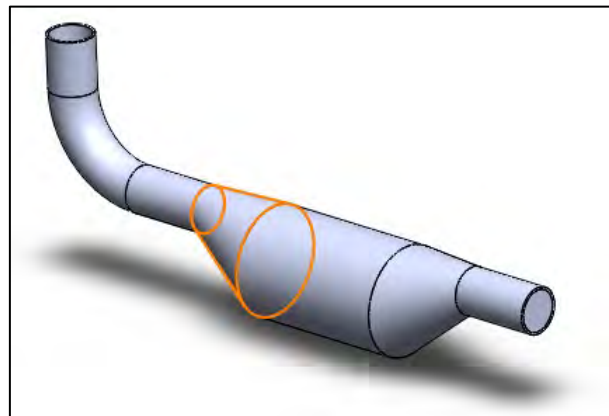
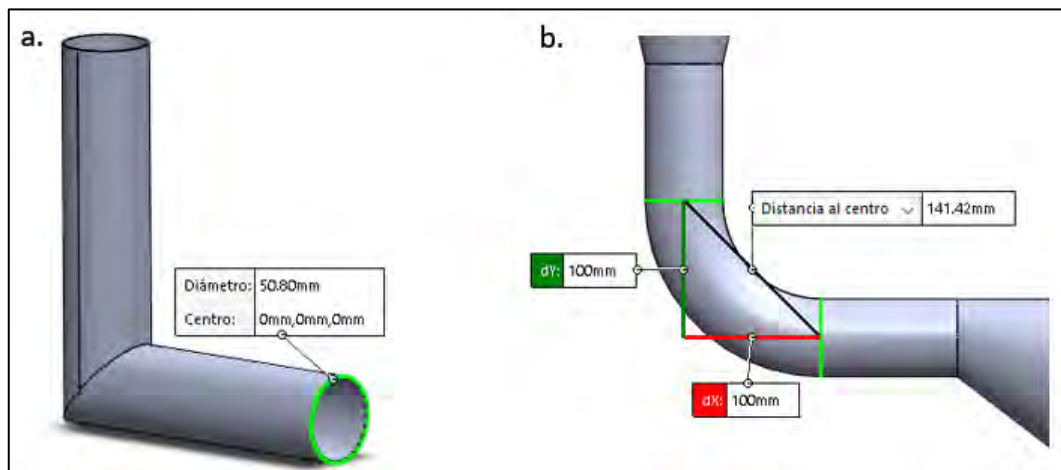
**Figura 24***Diseño 1 de cámara*

Se construyó otro diseño donde el aire empujado por el *blower* ingresará en un parte inferior a la cámara y para ir expandiéndolo se usa un diseño cónico (Figura 25). En el interior de la cámara cilíndrica estarían equipos para calentar el aire y finalmente este se dirige mediante otro cono hacia el codo, previo al reactor.

**Figura 25***Diseño 2 de cámara*

Posiblemente el aire no logre expandirse de manera natural, así que se propone también una cámara de calentamiento del mismo diámetro que la salida del *blower*, tiene forma de gusano (Figura 26) para no sobredimensionar el diseño. Por último, se diseñó una cámara con conos a ambos lados y queda de sugerencia añadirle deflectores para generar desorden en el flujo de aire, pues el aire debe calentarse ahí (Figura 27).

Dejando la cámara de secado, el flujo de aire necesariamente debe cambiar su dirección horizontal a una vertical. Para ello se diseñó un codo de 10 cm de radio cuya curva ayudará, a diferencia de un codo totalmente recto, a que no haya retorno en el flujo de aire en la esquina. En la Figura 28 se puede ver la comparación. Las simulaciones en estas piezas como parte de un reactor serán descritas en el capítulo 4.

**Figura 26***Diseño 3 de cámara***Figura 27***Diseño 4 de cámara***Figura 28***Codo para cambiar la dirección del flujo*

### 3.3 Geometría del lecho del café

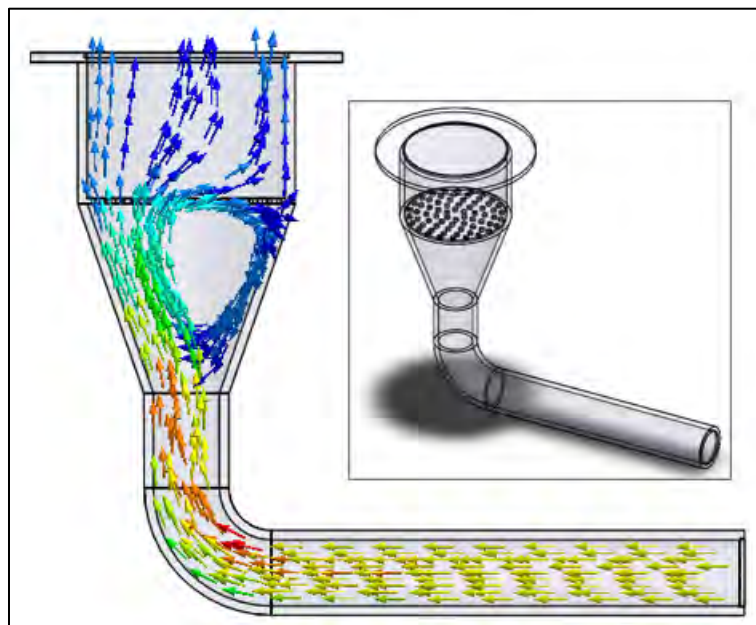
El transporte no uniforme de aire visto en la Figura 21 puede corregirse si es que este llega a toparse con una placa perforada con patrón o sin él. En la tesis de (González, 2014), se trabajó con 3 diseños de lechos, a los que él llama distribuidores, teniendo de variable la caída de presión. Terminó eligiendo uno cuyas perforaciones eran bastante contiguas, de manera circular y aproximadamente de 0.7 mm de diámetro.

Diseñar un distribuidor como tal resulta sencillo, pero en la práctica generaría costos que de alguna manera se pueden reducir. En la presente tesis se usará malla de alambre galvanizado, cuyo tejido da agujeros cuadrados son de 0.5 mm de longitud. Además, se ha previsto que, si el diámetro de esta malla se acerca a 2", como el tubo de salida del *blower*, el flujo de aire se aprovechará en mayor parte.

Cabe mencionar que se diseñaron distribuidores para observar ciertas simulaciones, como en la Figura 29 se ve que un lecho circular sólido perforado y con espacios relativamente gruesos se genera un retorno de flujo, sin embargo, el flujo que logra atravesarlo logra dispersarse en el cuerpo. De ello surge la pregunta de cómo aprovechar el empuje de aire en una sola corriente.

**Figura 29**

*Dispersión de flujo usando distribuidor*



El lecho que se propone a utilizar será de menor superficie que el utilizado en el prototipo y centímetros más abajo, ello para aprovechar que a menor sección el empuje del *blower* lograría suspender granos de café, parte de una masa total de 5 kg.

La superficie se puede determinar según la velocidad de mínima fluidización, asumiendo que la velocidad que circule por el lecho sea constante en toda el área. Además, se hizo una prueba con un tronco de cono como reactor y se pudo rescatar que, si el diámetro del área menor es relativamente pequeño, los granos se ajustarán entre sí y el empuje no logrará levantar ninguno de ellos, mientras que si el diámetro va aumentando la fluidización es más notoria, pero en todo proceso hay un punto de inflexión.

### 3.4 Geometría de la columna de secado

La columna de secado o reactor es el espacio donde se llevará a cabo la fluidización de los granos de café. Se le denomina columna, porque en los secadores de lecho fluidizado construidos a nivel global, este reactor está en forma vertical. El material con el cual se diseña esta columna es acero inoxidable, como lo hicieron (Cabanillas & Rodas, Diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado., 2023), para que la humedad liberada no oxide las paredes laterales, o bien de un material acrílico para observar el fenómeno como lo hicieron (González, 2014) y (Jaramillo & Narváez, 2012).

Las tres fuentes consultadas tienen en común que el soplador que utilizaron estaba disponible para que se le pueda adaptar al prototipo y si necesitaban una determinada fuerza de empuje para fluidizar lo hacían variando el diámetro del lecho, diseñando un distribuidor de aire, o bien variando los diámetros de las tuberías. En este caso se tiene disponible un soplador, sin embargo, la masa que se pretende fluidizar no es comparada a las pruebas con las que trabajaron los testistas antes mencionados.

Jaramillo & Narváez (2012) utilizaron un distribuidor de aire de dos troncos de cono contrapuestos, entendiéndose que la finalidad de ello era para enviar el aire de manera uniforme hacia el reactor cilíndrico que contenía la masa de granos de maíz. El reactor que usaron tenía 1 metro de alto con 15 cm de diámetro y el aire absorbido por el soplador era calentado por una cámara de níquelinas de 10 kW posicionadas antes del soplador.

En una demostración de resultados, fluidizaron medio kilogramo de soya, controlaron la variable temperatura del aire mediante la potencia suministrada a las níquelinas y el control de la velocidad del aire era según el valor que percibían los sensores. Se notaba un lecho de tipo burbujeante, el aire empujaba de manera intermitente sobre el lecho causando que los granos floten y caigan dentro del reactor.

Por su parte (González, 2014) tuvo a su disposición un prototipo de secador construido en su universidad (Figura 30), cuyo reactor era de 60 cm de alto con 12 cm de diámetro. La capacidad del *blower* era suficiente para fluidizar los granos de 2.5 kg de quinua, producto para el cual fue diseñado. La cámara de calentamiento se encontraba después del soplador, era de acero inoxidable al igual que el reactor, sin embargo, las dimensiones no estaban diseñadas para fluidizar una masa mayor a la antes mencionada.

Trabajando en el prototipo de secador instalado en la Universidad de Piura se pudo evidenciar un sobredimensionamiento, cuya consecuencia final era el no poder fluidizar masas mayores a 3 kg, pues el aire se direccionaba en un solo lado al tener un lecho de 21.5 cm y sin distribuidor como el de la Figura 31. Aparte, se realizó una prueba simple con una cubierta cilíndrica de 12 cm de diámetro y cuando se agregaron 2 kilogramos de café, estos se apretaban causando que el aire intente salir por el mínimo orificio.

Es por estos comportamientos que se pensó que un diseño cilíndrico de reactor tendría dificultades para lograr fluidizar el mayor valor de masa propuesto, 5 kg. Es decir, si el diámetro era relativamente mayor, el empuje del aire solo fluidizaría granos de una zona lateral y si el diámetro es ligeramente menor los granos se apretarían entre sí causando que la fluidización no tenga lugar.

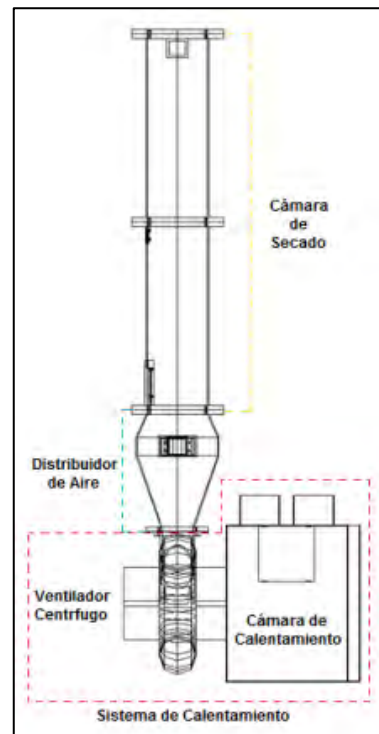
Se ha leído que los reactores cónicos tienen mejor rendimiento termodinámico que un cilíndrico, se cree que un área del lecho pequeña nos sirve para aprovechar la velocidad que proporciona el *blower* y se pensó que al centrar el empuje este levitaría los granos del centro, los dirigiría al área lateral y los espacios que van dejando serían ocupados por los granos más cercanos gracias a la fuerza de gravedad, tal comportamiento se plasma en la Figura 32.

**Figura 30**  
*Secador de quinua*



*Nota.* Adaptado de (González, 2014).

**Figura 31**  
*Secador de maíz*

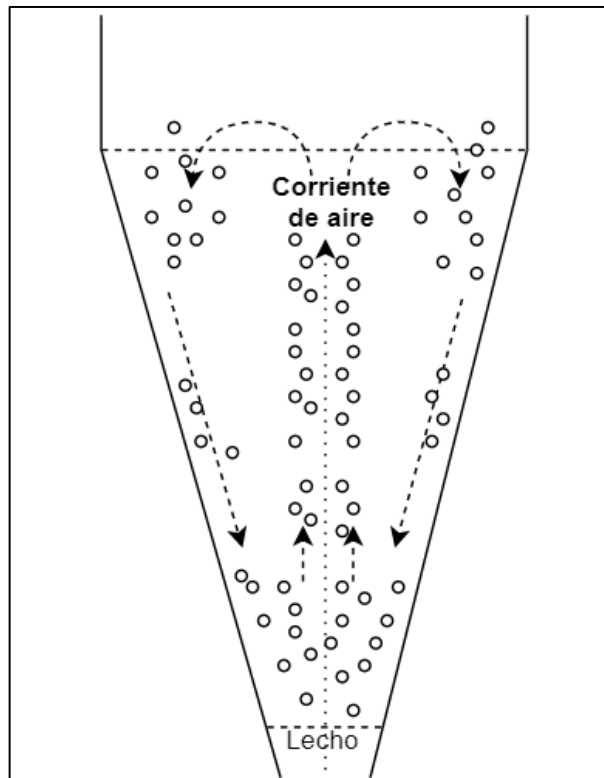


*Nota.* Adaptado de (Jaramillo & Narváez, 2012).

El comportamiento que se puede imaginar no necesariamente será así, puede que el aire siga dirigiéndose a la parte lateral, pero el sentido cónico que se le piensa dar hará que este comportamiento en los granos se dé. Con ello se garantiza que todos recibirán la corriente de aire caliente para asegurar la uniformidad del secado.

**Figura 32**

*Idea de fluidización de granos de café*



### 3.5 Velocidad de mínima fluidización para diferentes masas de café

Se tuvo lugar para realizar pruebas con café pergamino en el prototipo de secador de café de lecho fluidizado en la Universidad de Piura. Este cuenta con una puerta lateral, parte del diseño para colocar y retirar la masa a secar, observando ahí la propuesta de una mejora pues al abrir y cerrar por donde circulará aire, produciría a la larga un desgaste y fugas de aire.

Se tenía 5 kg de café para que se observe la fluidización y velocidad obtenida por el sensor instalado. Previo a la muestra de los resultados obtenidos, se retoma la ecuación 4 y Tabla 2 para calcular la velocidad mínima de fluidización que se necesitaría teóricamente para fluidizar café pergamino. Este valor resulta de 19.53 m/s y en base a este dato se diseña un lecho de diámetro cercano a 2", que es el diámetro de la tubería por donde a 60 Hz transitan 35.5 m/s como valor máximo según la Tabla 4.

Las pruebas que se realizaron para observar la fluidización de 500 gramos se evidencian en la Tabla 5. El valor de la velocidad es tomado por el sensor eléctrico parte del sistema de medición y se puede ver en la Figura 20.

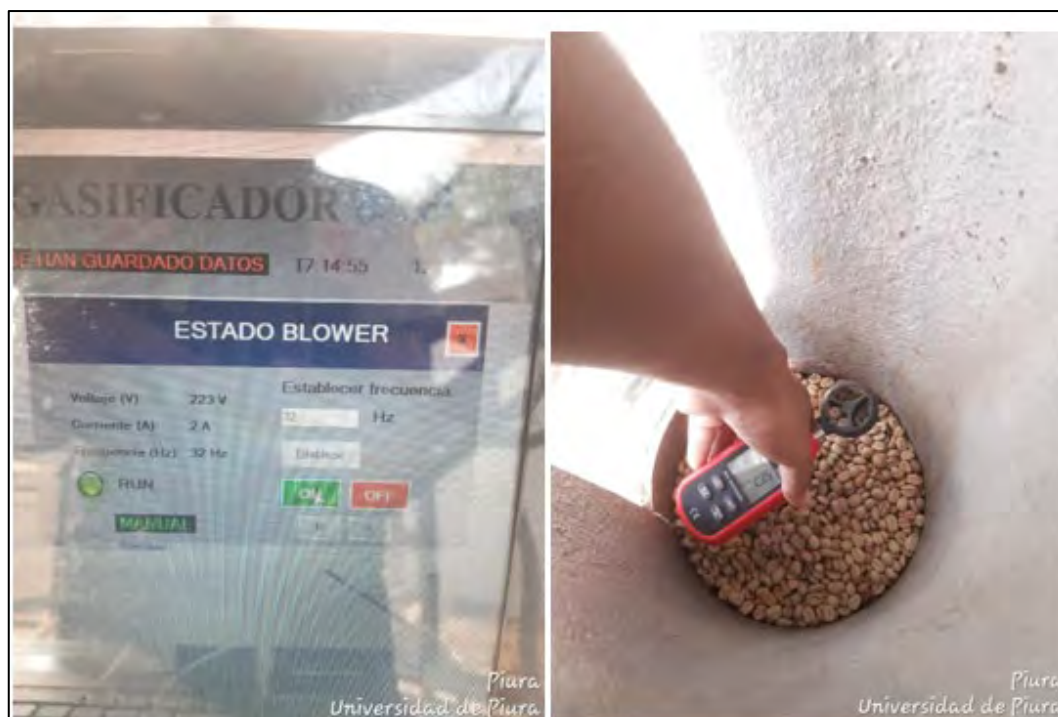
**Tabla 5**

*Datos al realizar pruebas con 500 g de café*

Frecuencia (Hz)	Velocidad medida (m/s)	Comentario
20	0.8	No fluidizan
30	1.6	Granos con ligera vibración
32	2	Granos con ligera vibración
35	2.6	Aire comienza a levantar granos en zona lateral
38	3.3	Aire empujado cambia de zona
40	3.5	Granos flotan y caen al extremo.
50	4.6	Fluidizan en dos direcciones
60	5.4	Fluidización no es uniforme

**Figura 33**

*Toma de datos durante las pruebas*



**Figura 34**

*Vista de la fluidización de granos*



A 60 Hz también se probaron 3 kg de café, donde la fluidización es un poco más notoria, porque no hay demasiados intersticios entre los granos y al ser ancho el lecho estos no se apretaban y de cierta manera dejaban pasar el aire que los fluidizaría. Además, logra observarse que no todos los granos son fluidizados.

**Figura 35**

*Vista superior de la fluidización de 3 kg de café pergamino*



Probando la idea de reactor cónico usando el distribuidor de aire que usaron en el prototipo. Se nota un movimiento más turbulento en los granos de café. El aire sigue teniendo tendencia a seguir la superficie lateral, pero la parte cónica permite que los granos de las partes donde no circula el flujo vayan cayendo hasta que sea su turno.

**Figura 36**

*Pruebas con estructura cónica*



**Figura 37**

*Vista superior de fluidización con estructura cónica*



Se implementó una forma de reactor cónica, sin embargo, el diámetro a lo largo de este no aumentaba demasiado por lo que los granos de café (5kg) se apretaban entre sí y el aire no lograba cumplir su función. Sin embargo, usando una masa de 500 gramos, los granos fluidizaban fácilmente.

### Figura 38

*Prueba en geometría cónica pequeña*



Es después de ello que se arma un cono de mayor abertura y el resultado satisface las expectativas quedando listo para perfeccionar el diseño mediante *software* de simulación. Se decide que el reactor debe ser cónico, la velocidad de mínima fluidización es cercana a 19 m/s y la parte cónica apoyará a que la masa de 5 kg fluidice.

**Figura 39**

*Geometría cónica con café fluidizando*



**Figura 40**

*Café pergamino utilizado*



## Capítulo 4

### Diseños en *software* de simulación

#### 4.1 Análisis de flujo de aire variando parámetros de diseño

Para el diseño del secador, el aire circundante será absorbido por el soplador, se redirigirá a través tuberías hacia una cámara de calentamiento y luego a un reactor de secado donde causará la levitación de los granos, mismos que irán liberando el agua ligada en forma de vapor.

En el capítulo 3 se trató de mostrar que el aire debe circular por todos los granos para que se hable de una fluidización efectiva y que si se contaba con un *blower* ya establecido se trabajaría el diseño de las tuberías o el reactor de tal manera que el objetivo se cumpla.

En esta sección se pone en evidencia lo trabajado en *SolidWorks* en cuanto al secador y sus respectivas simulaciones para el flujo de aire. El programa ofrece la herramienta *Flow Simulation* (Figura 41) justo para ver y analizar un comportamiento cercano a la realidad de fluidos dentro y fuera de diferentes volúmenes.

Se han creado diferentes sólidos que representen al secador en el programa y a medida que se variaban se ejecutaban pruebas para hacer seguimiento al comportamiento del fluido. Para ello fue necesario construir el equipo, cerrar los orificios mediante la aplicación de “*lids*”, crear el proyecto, definir las condiciones de frontera como presión y flujo volumétrico, para luego ejecutar el programa y obtener la simulación.

**Figura 41**

*SolidWorks Flow Simulation*

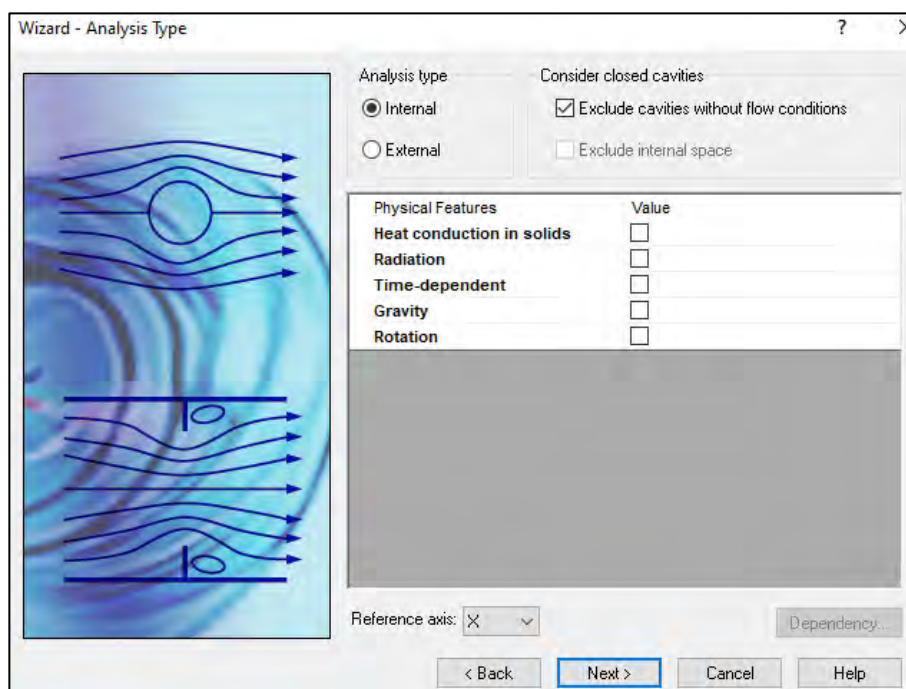


Figura 42

Condiciones de frontera

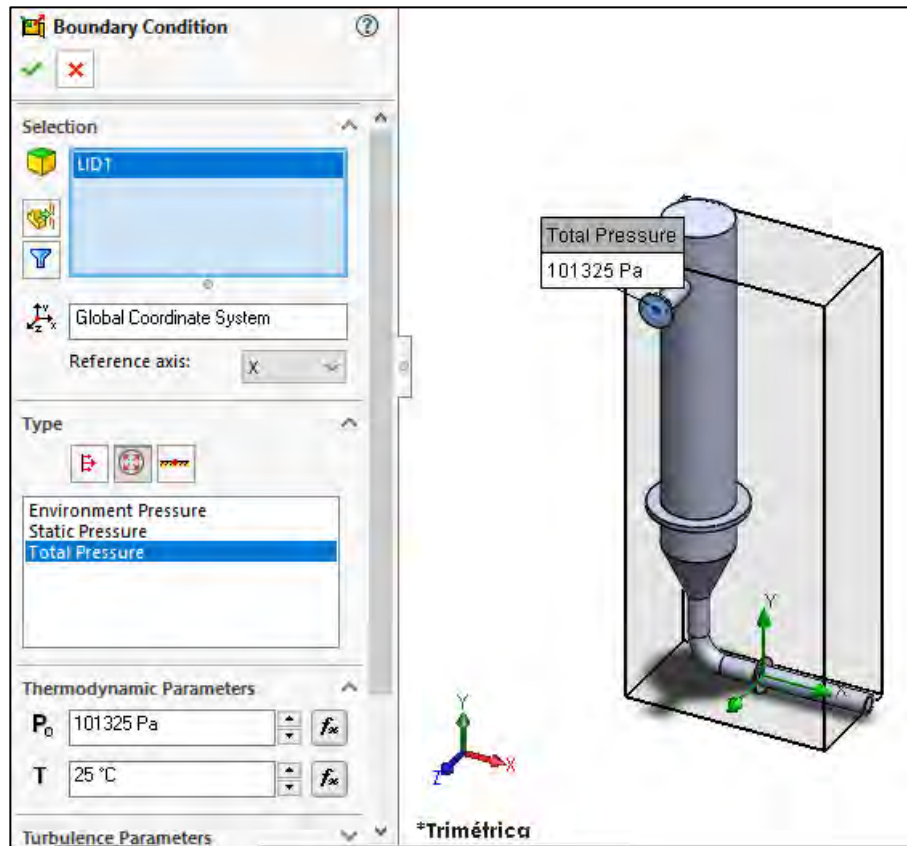
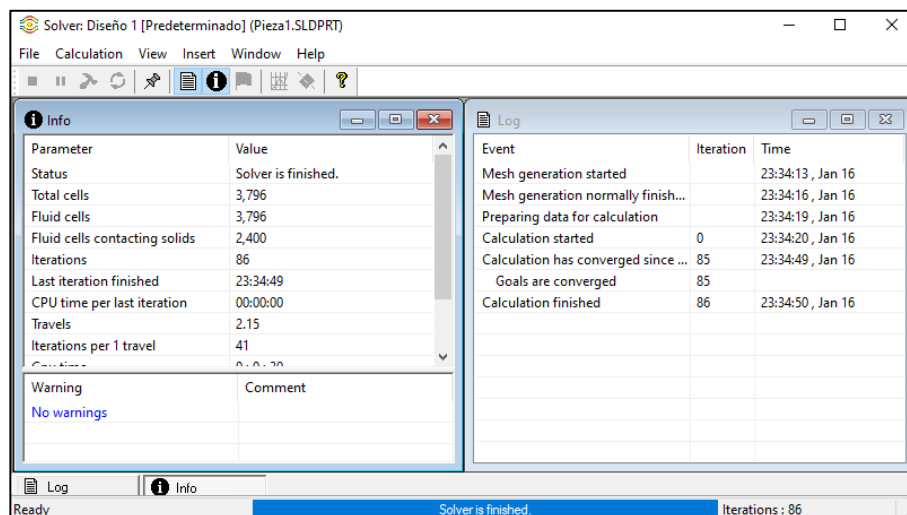


Figura 43

Ventana de evento solucionado

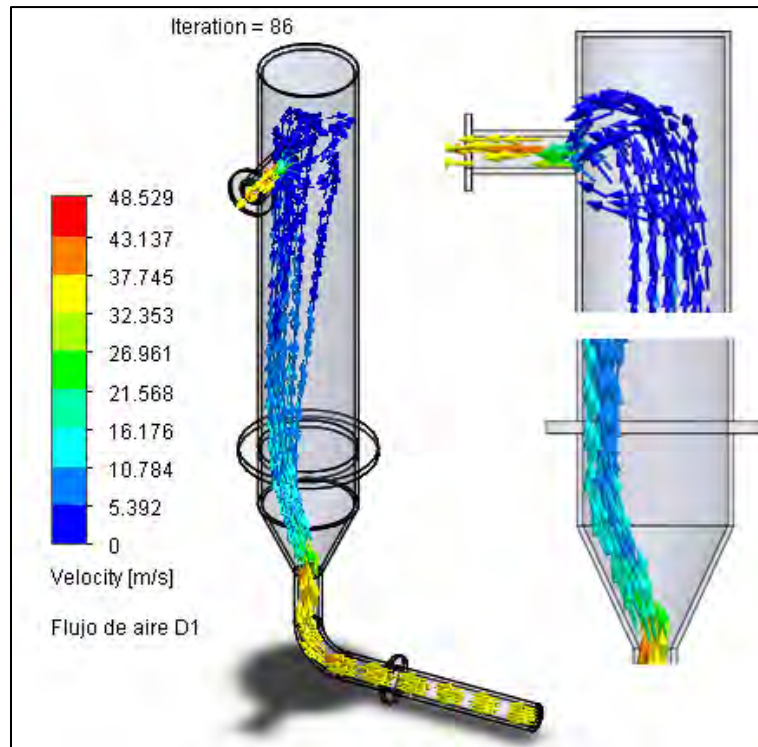


Para la primera simulación se creó el prototipo que está instalado en la universidad. Este se debe crear como una sola pieza, ya que si fuera un ensamble se presentan dificultades al correr la simulación. En campo, las piezas que lo conforman están separadas, pero se

juntaron mediante soldadura y bridas con la finalidad de no tener fugas de aire. Sus condiciones de frontera fueron de  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  de aire al ingreso y 1 atmósfera de presión a la salida.

**Figura 44**

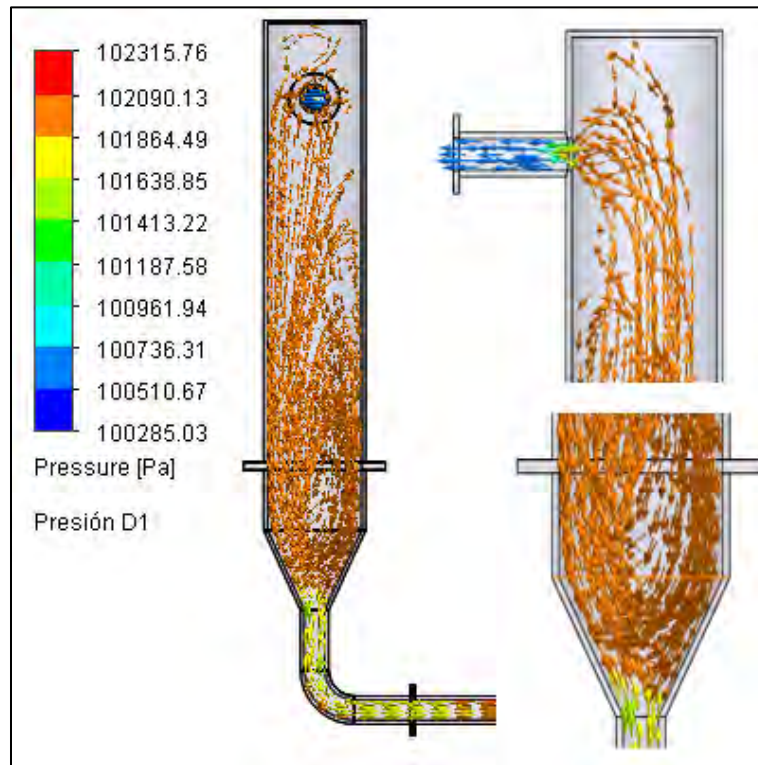
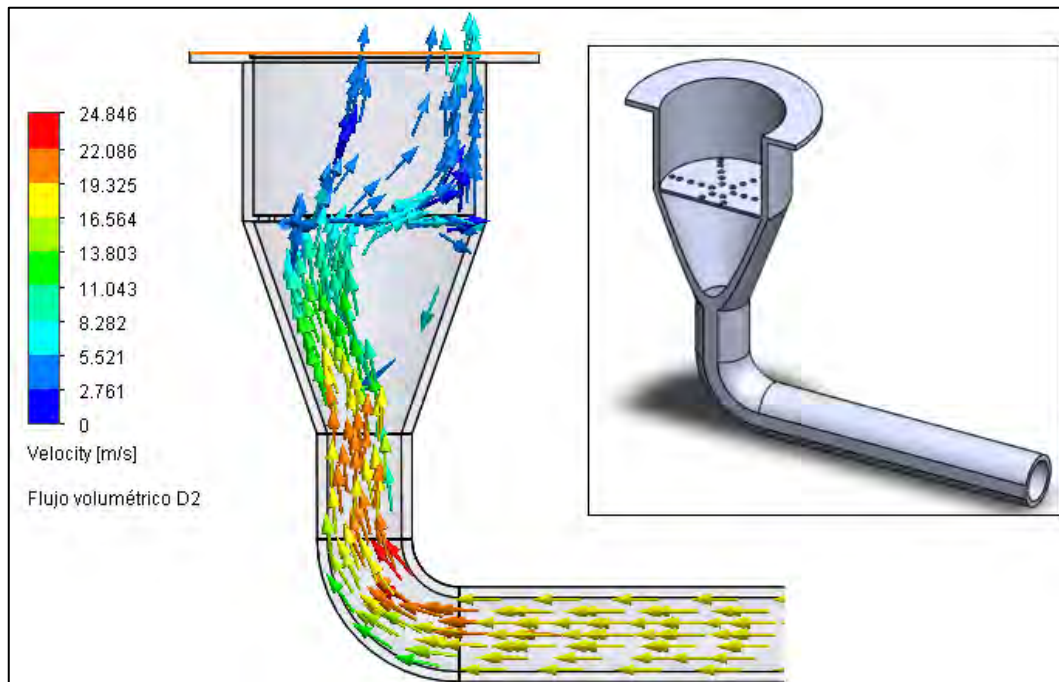
*Simulación en prototipo UDEP*



En la Figura 44 se puede constatar que una corriente de aire prevalece y no va por el centro. El flujo dado por el *blower* va con una velocidad cercana a los 35 m/s, disminuye a 23 m/s en el ingreso al distribuidor y finaliza con 5 m/s en la parte superior del reactor. Esta fue la primera simulación que hizo pensar en qué manera se le podría dar vuelta a ese resultado.

Alrededor de esa notoria corriente de aire existen otras a una velocidad ligera la cual se puede evidenciar al analizar la Figura 45. La presión de una atmósfera se colocó como condición de frontera a la salida del equipo (color verde) y dentro del reactor se puede ver que la presión del aire es mayor a 1 atm, la cual causa la levitación de los granos de café.

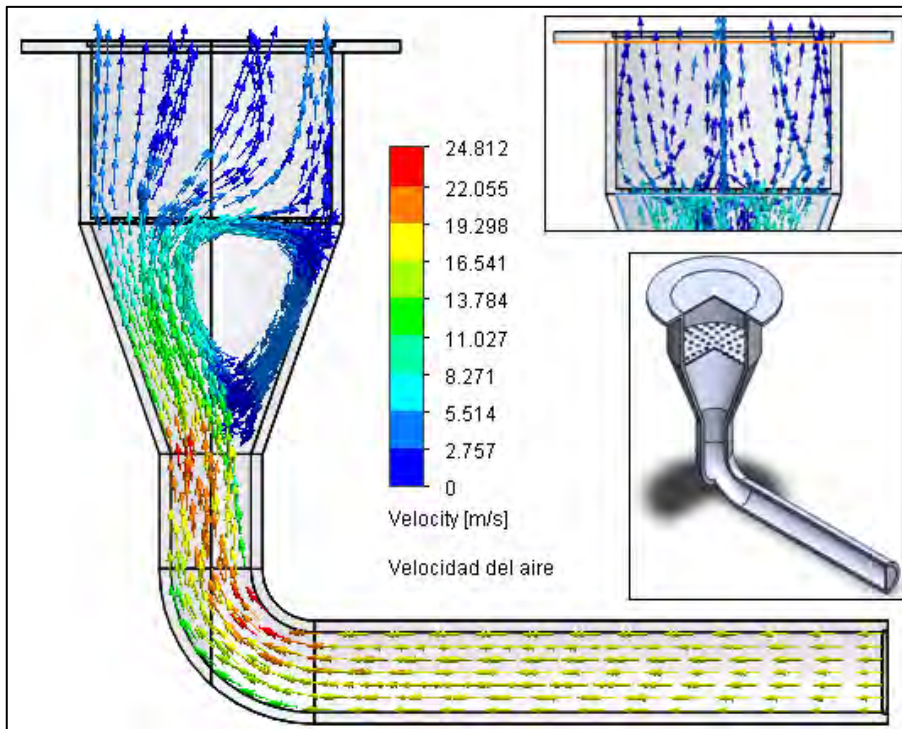
Una sola corriente de aire no ayuda a fluidizar, lo que llevó a buscar la manera de esparcir esa corriente sobre el lecho de granos. Se simuló colocando un lecho de perforaciones limitadas, lo cual significa que entre ellas habrá separaciones sólidas más gruesas que las de una malla. En la Figura 46 se observa que el resultado se cumple, pero no es el más eficiente, ya que el *palet* muestra una velocidad máxima de 25 m/s.

**Figura 45***Simulación de la presión de aire***Figura 46***Simulación con lecho de perforaciones en línea*

Se desarrolló otro lecho con perforaciones en círculo y el resultado de la simulación se ve mejor, porque hay mayor uniformidad en las corrientes de aire al pasar hacia el reactor. La desventaja vuelve a ser que la velocidad de estas fluctúa cerca de 7 m/s, comparada a la de 19 m/s como velocidad de mínima fluidización que se ha calculado como necesaria. Esto se debe al reflujo de aire previo al lecho.

**Figura 47**

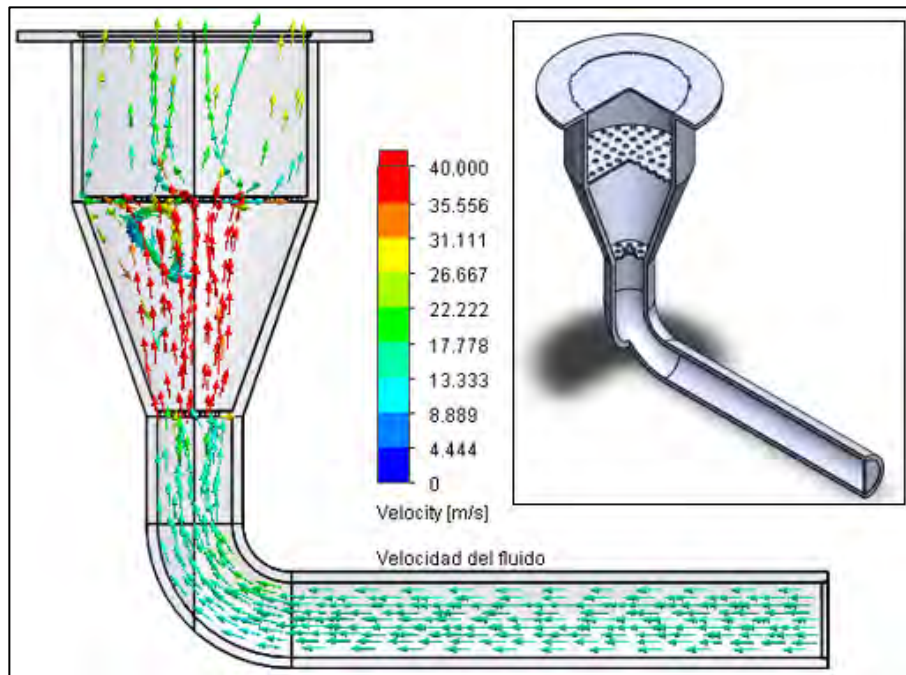
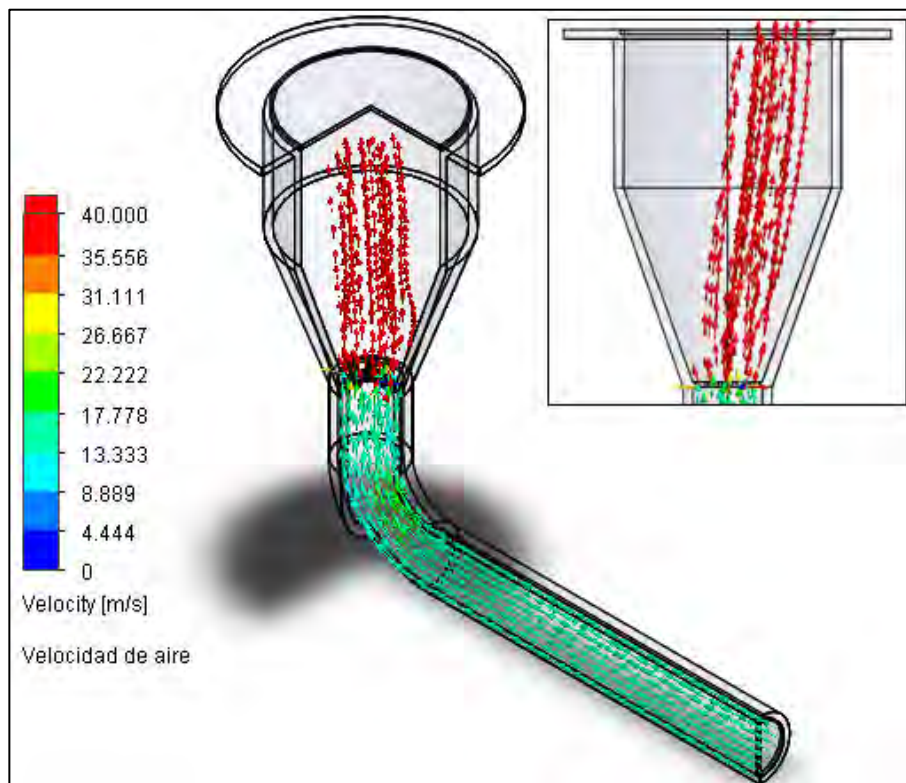
*Simulación con lecho de perforaciones en círculo*



Para que no exista reflujo del gas es necesario que no se vaya pegado a la pared, por lo que se plantea colocar una placa perforada en la salida del codo. En la simulación se tiene un aumento de velocidad debido a la reducción de área, ya no hay una corriente de aire pegada a la pared y se tienen corrientes de aire con velocidades de 13 m/s al pasar por el lecho (Figura 48).

En la Figura 49 se simuló quitando el lecho de perforaciones circulares y manteniendo la placa a la salida del codo. Se entiende que en vez del lecho iría una malla cuyo espesor de las separaciones es muy fino, una malla similar a la que aparece en la Figura 22. Los resultados muestran una corriente de aire con velocidad de 37 m/s casi vertical, por lo que se tendría mayor fluidización en la parte céntrica y los granos alrededor se mantendrían estáticos.

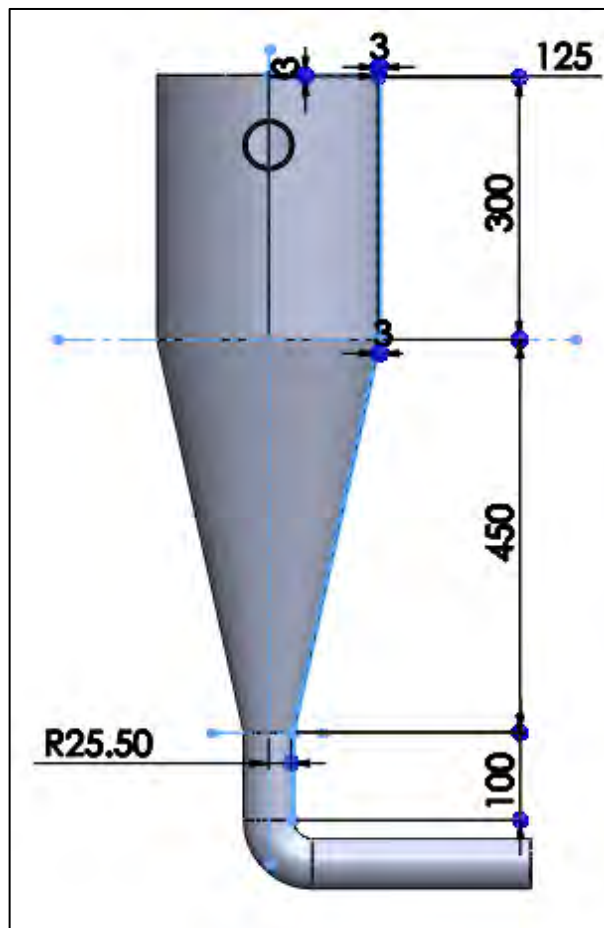
Se puede concluir de estas simulaciones que un reactor tipo cilíndrico con el diámetro de 21 cm no ayudaría a fluidizar una masa de 5 kg de café. Se observó que existe una corriente de aire que se adhiere a la zona lateral, lo que agrega valor a la idea de diseñar el reactor en forma cónica.

**Figura 48***Simulación con placa perforada a la salida del codo***Figura 49***Simulación con lecho hecho de malla*

Se construyó el croquis y las operaciones correspondientes en el *software* para obtener un reactor cónico (Figura 50). En él se harán las simulaciones del flujo de aire variando el ángulo de salida del tronco de cono. La altura que se le ha dado es la del valor promedio necesario para almacenar los 5 kg de café en la zona inclinada.

**Figura 50**

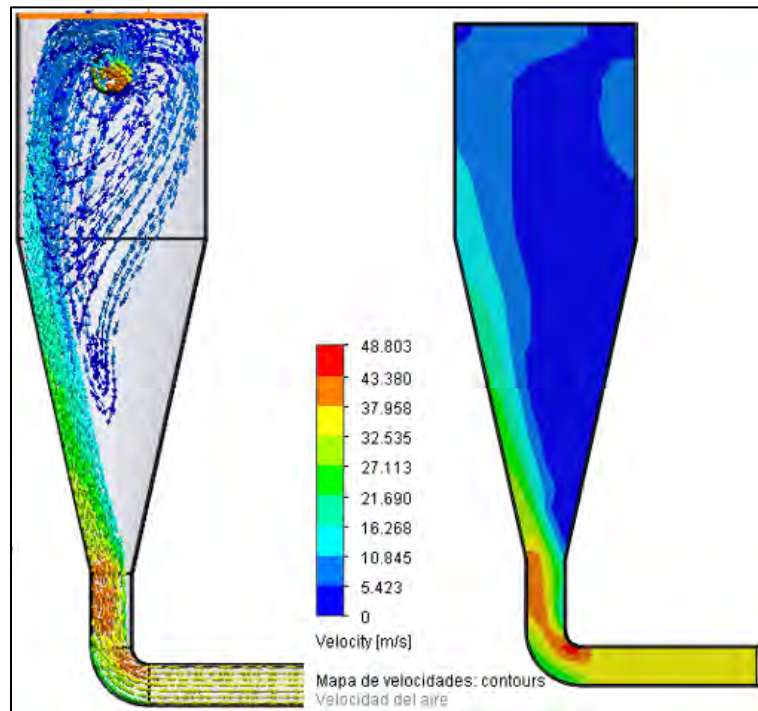
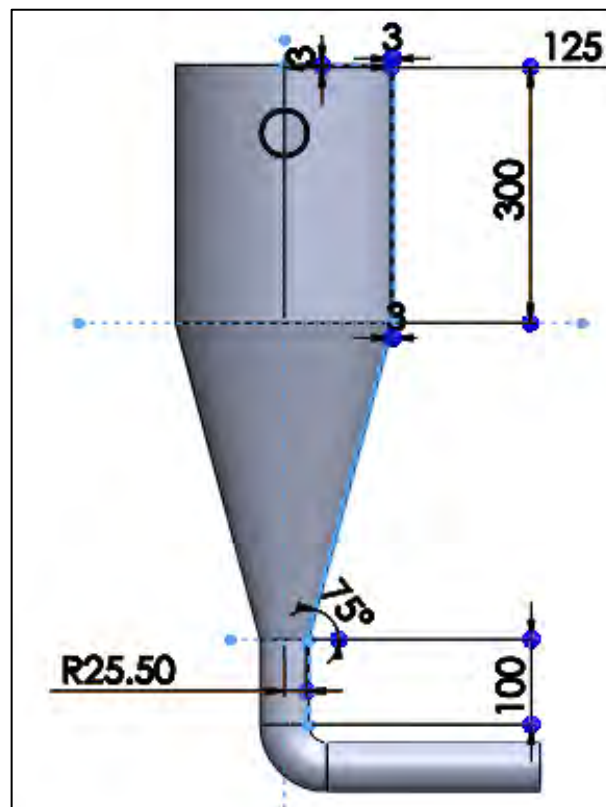
*Reactor tipo cónico de 25°*

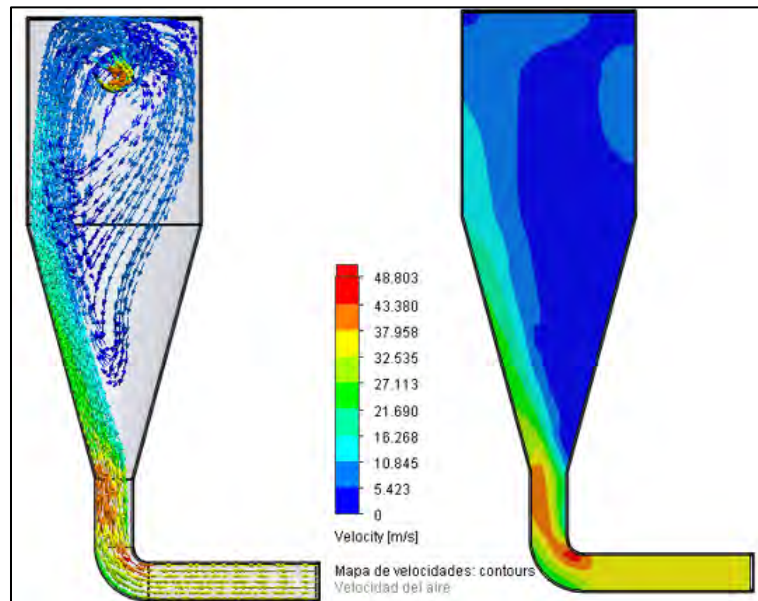
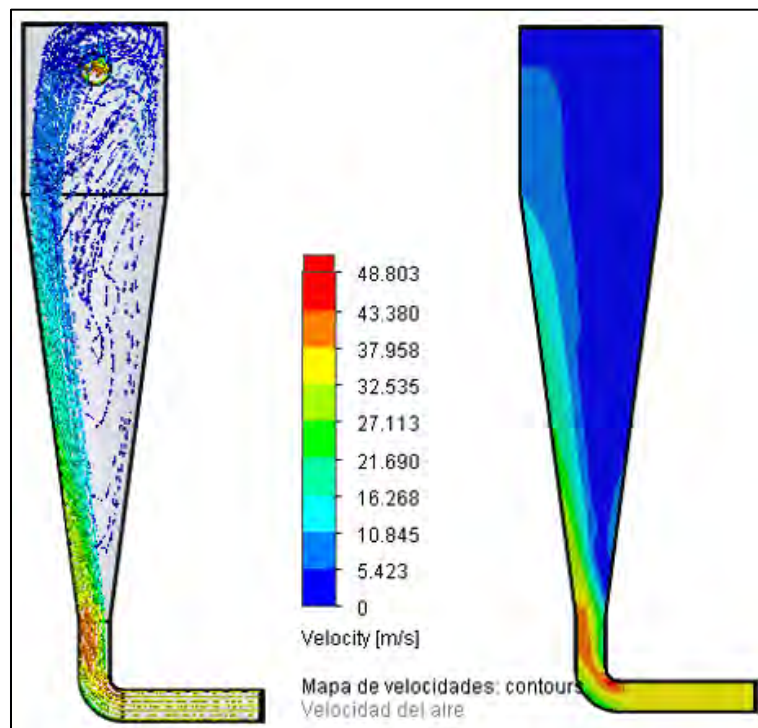


La simulación para esta forma a 25° se muestra en la Figura 51. La corriente de aire que más sobresale se adhiere a la pared lateral y sus valores van desde 37 a 16 m/s como valor final. En esa figura se puede ver un mapa de velocidades en un plano alzado, donde el objetivo será que los granos ya fluidizados se dirijan a la zona de color azul.

Simulando en un reactor cónico a 30° (Figura 52) se tiene en el mapa de velocidades que la zona de 16 m/s es más amplia que en un reactor de 25°, sin embargo, la zona de velocidades de 27m/s (Figura 53) es similar, valor que genera mayor empuje sobre los granos.

En cuanto a la simulación en un reactor a 20° la corriente de aire tiende a alinearse a la vertical, las corrientes de velocidades cercanas a cero ya no generan un reflujo y tienden a acercarse al ingreso del reactor para ser arrastradas por las de mayor empuje.

**Figura 51***Comportamiento del fluido reactor cónico a 25°***Figura 52***Reactor cónico a 30°*

**Figura 53***Simulaciones en reactor cónico a 30°***Figura 54***Simulación en reactor cónico a 20°*

El reactor cónico presenta mayor ventaja que uno cilíndrico en las simulaciones realizadas, de ellas la de 25° resultaría óptima para la aplicación gracias a las velocidades de las corrientes y el espacio interno. En la experimentación hecha con el prototipo UDEP el cono con el que se fluidizó tenía cerca de 25° de abertura.

En la experimentación realizada por (Hirakh et al., 2020) compararon un reactor de 5 y 10° para una masa de 2.5 kg, obteniendo que el de mayor abertura les brindaba mejores resultados. En el presente trabajo se experimentó usando un cono de 10°, pero los granos se ajustaban entre sí y la corriente de aire no podía vencer el peso acumulado (Figura 38).

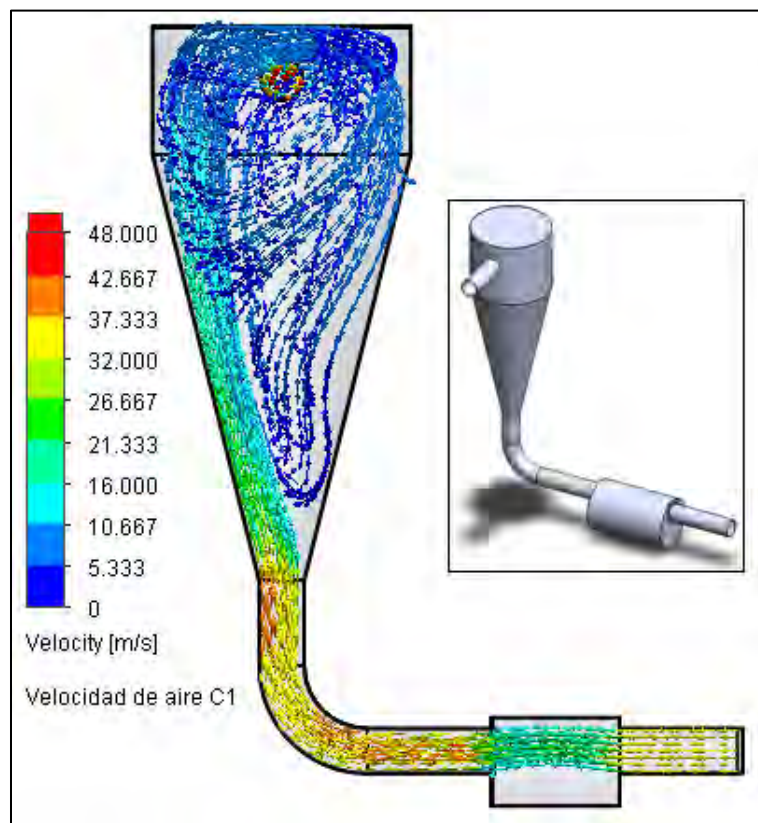
Se define entonces, que usando un reactor cónico aprovechamos que el flujo mantenga su velocidad como a la salida del blower, los granos fluidizarán ordenadamente, a medida que suben unos, bajan otros y se repite el ciclo. A partir de ahora los diseños serán en base a un reactor de este tipo, teniendo pendiente las simulaciones para proponer el diseño de la cámara de calentamiento de aire.

Esta cámara es una parte del diseño que de una manera u otra influirá en la velocidad del aire. El *blower* instalado en el prototipo cuenta con un tubo de aspiración de 3", el cual contiene su filtro, por ende, se decidió que el aire que absorba será el circundante con sus respectivas características físicas y será enviado a la cámara para su calentamiento.

La idea para calentar el aire se basa en que, el espacio de la cámara sea tolerable a que el aire se expanda, disminuya su velocidad, caliente al estar en contacto con resistencias eléctricas y luego pase por una estructura que le permita recuperar la velocidad con la que iba. Para proponer la cámara de calentamiento se realizarán ciertas simulaciones.

**Figura 55**

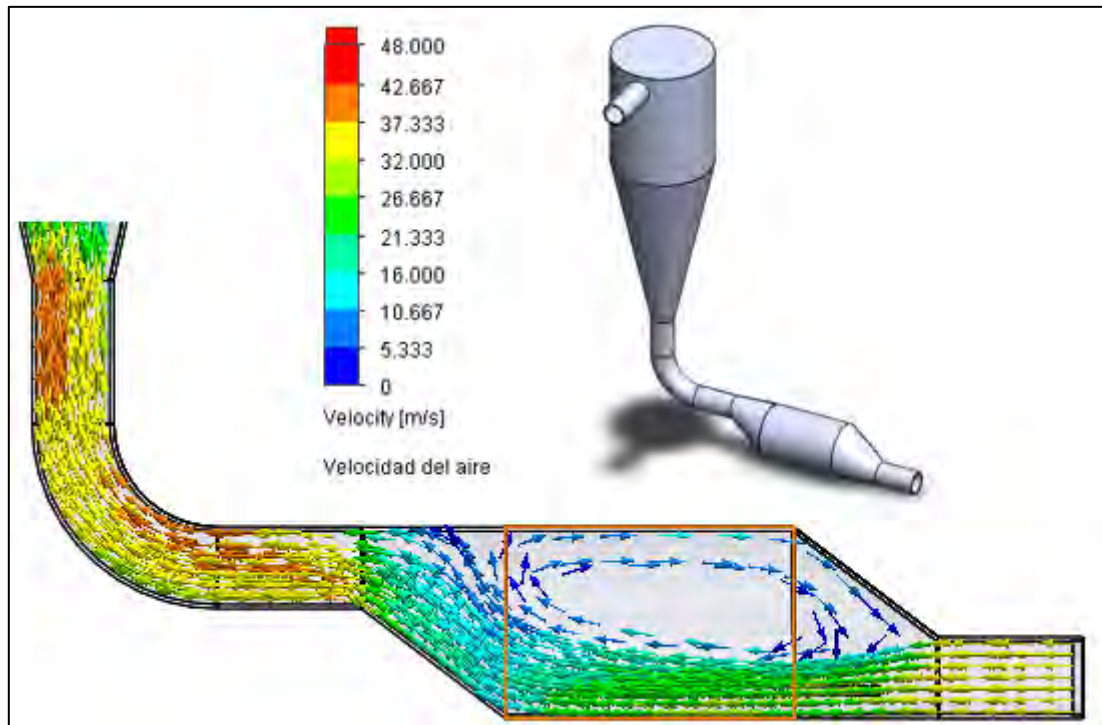
*Cámara cilíndrica*



Cuando se tiene la cámara totalmente cilíndrica con entrada y salida a la misma altura, la corriente de aire no tiene ningún reparo en expandirse, por lo que no resulta conveniente. En la Figura 56 la entrada y salida de aire a la cámara se colocaron a diferentes alturas, obteniendo que corrientes de mínima velocidad se separan de la corriente con más empuje y generan un reflujó, mas no una expansión.

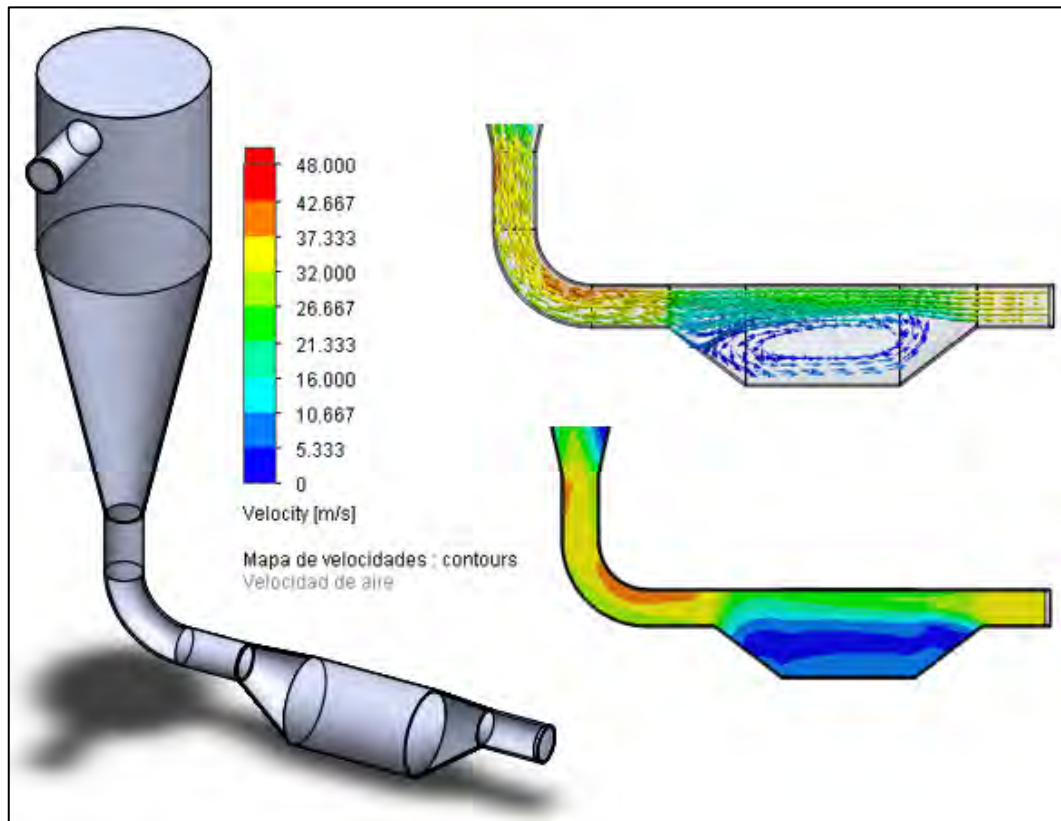
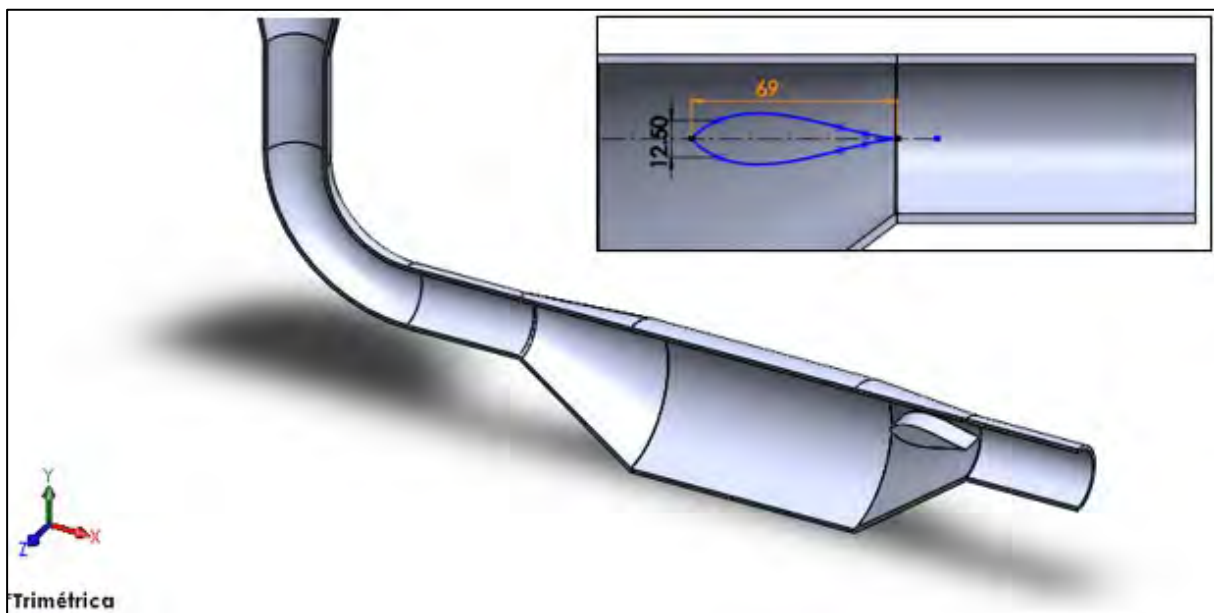
**Figura 56**

*Cámara con dos troncos de cono opuestos axialmente*



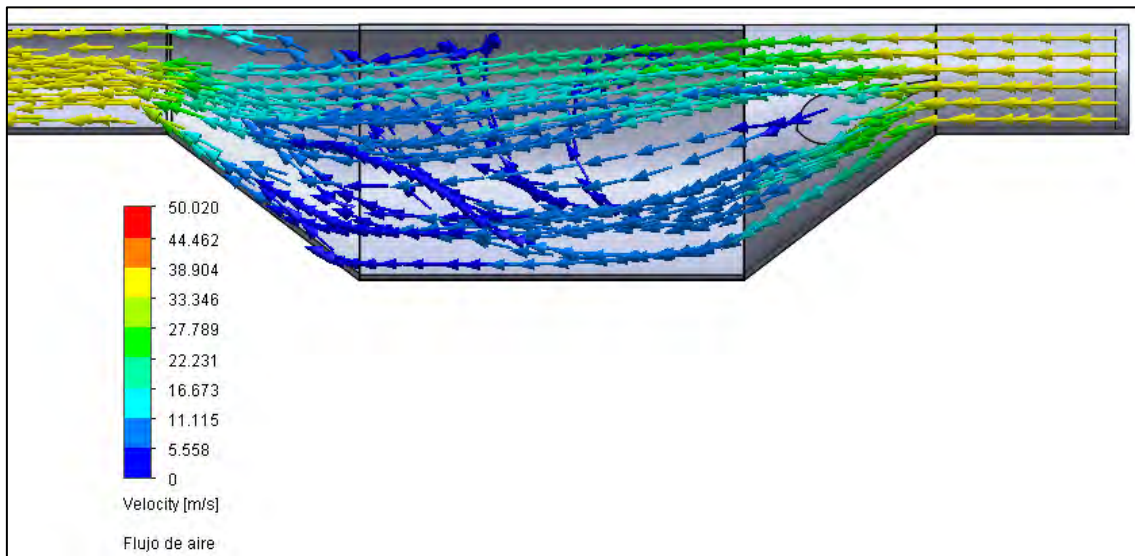
Colocando los dos troncos de cono opuestos verticalmente y simulando (Figura 57) se obtiene que la corriente de aire con mayor empuje pasa hacia el reactor, pero las de menor empuje generan reflujó en la parte vacía de la cámara. Esto es un alcance que instó a colocar un obstáculo para generar turbulencia.

Tal obstáculo debería estar al ingreso de la cámara, ya que a la salida estaría siendo una causa de reflujó y no ayudaría a recuperar la velocidad del aire después de expandirse. El primero en plantearse a usar es un álabe ubicado en manera horizontal (Figura 58), pero observando la simulación, el aire solo pasaba por su superficie y volvía a juntarse después de pasar sobre él. Luego, instalado de una manera inclinada se obtuvo mejores resultados, turbulencia, sin reflujó y recuperación de la velocidad (Figura 59).

**Figura 57***Cámara con dos troncos de cono opuestos verticalmente***Figura 58***Inserción de álabe horizontal como deflector*

**Figura 59**

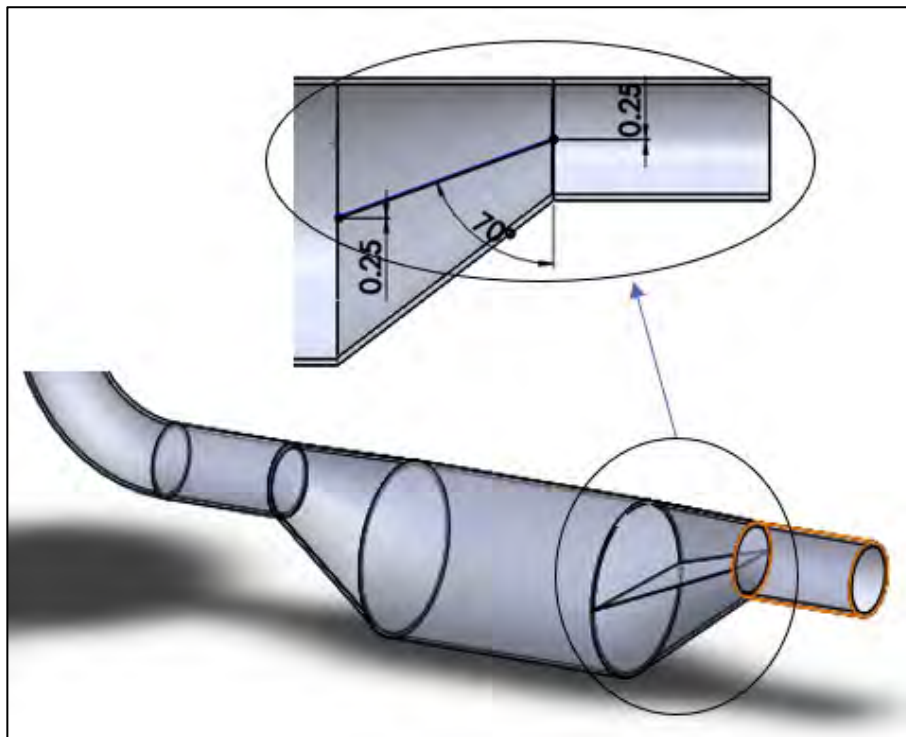
*Simulación usando ábabe en posición inclinada como deflector*



En cuanto a la fabricación del ábabe y la instalación en un prototipo genera preguntarse por los costos, así que se realizará la simulación con un deflector más sencillo de fabricar e instalar para hacer una comparativa y *post* elección. En la Figura 60 se ve el croquis de la construcción del deflector, con ese ángulo se obtuvo mayor turbulencia (Figura 61).

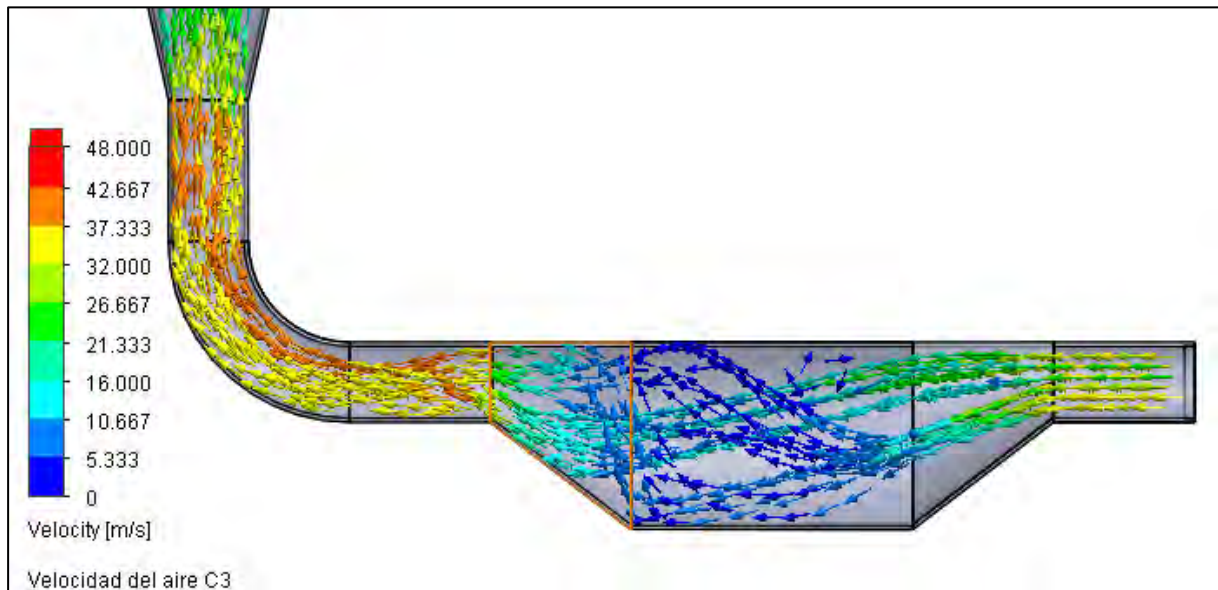
**Figura 60**

*Inserción de deflector plano*



**Figura 61**

*Simulación usando deflector plano*



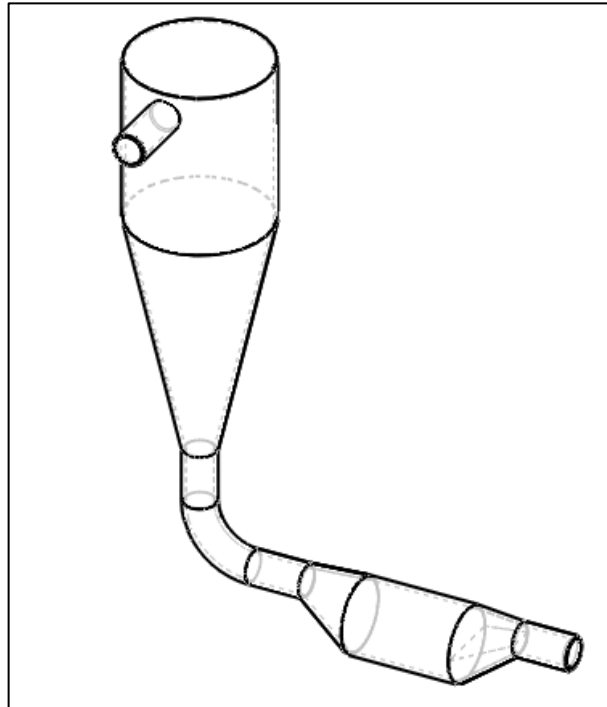
Comparando las simulaciones del flujo de aire usando deflectores queda definido utilizar el de superficie plana, pues el comportamiento se asemeja mucho y los costos del secador no se elevarán. Adicional a ello, hay que considerar que el colocar las resistencias eléctricas en el interior de la cámara puede colaborar con la turbulencia o bien ser otro obstáculo.

#### **4.2 Secador de lecho propuesto**

En base a las simulaciones realizadas y la aplicación de la teoría queda definido un secador (Figura 62) con las siguientes características:

- Reactor cónico con ángulo de 25° de abertura.
- Codo de 45° para cambiar la dirección de aire
- Cámara cilíndrica cuyos extremos son troncos de cono recto y se oponen verticalmente.
- El tronco de cono recto previo a la cámara de secado, desde el *blower*, contiene un deflector recto a 70° respecto a la vertical.
- Parte superior cilíndrica para cubrir la altura final del reactor, zona que complementa la fluidización, y tiene un agujero para permitir la salida final de aire.

Las dimensiones exactas se elegirán al finalizar la simulación del calentamiento de aire.

**Figura 62***Vista isométrica del secador propuesto*

El volumen ocupado por 5 kg de café pergamino es de  $0.0072 \text{ m}^3$  por lo que el cono reactor, para el ángulo de  $25^\circ$  y diámetro de la “base menor” igual a 2”, debe contar con una altura mayor o igual que 0.44 m. Experimentando con el prototipo UDEP se logró observar granos hasta 0.3 m por encima del volumen ocupado por toda la masa, así que se considera una parte cilíndrica encima del reactor cónico de esa altura para dar libertad a la fluidización y evitar que los granos se perjudiquen a causa de golpear la superficie superior.

La salida del secador tiene la medida adecuada para que el aire pueda salir con facilidad, la simulación con un agujero menor a 2” indica que las corrientes de aire no generan reflujos y experimentalmente se concluyó que la velocidad con la que el flujo de aire salía ocasionaba vibración. En la Figura 63 se puede ver la comparativa. La escala de colores es la misma, donde rojo es la máxima, el retorno de aire en esa zona y la expansión del flujo de aire tienen bastante diferencia, por lo que se escoge la primera opción.

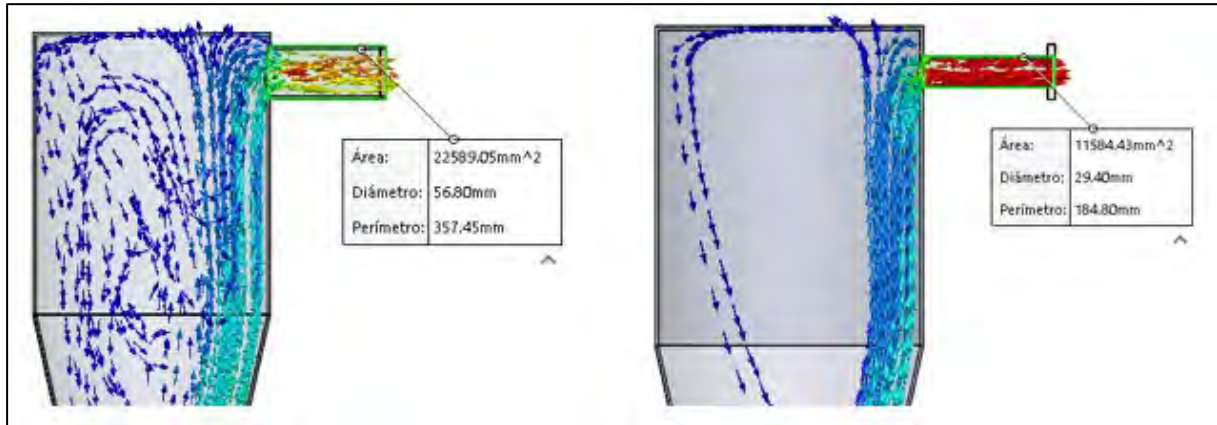
El codo no genera retorno en ninguna de las simulaciones debido a que tiene un alargue en ambos extremos de 0.1 m de tubo, ello para que el aire se haya recuperado a la salida de la cámara de calentamiento y al salir del codo para que se uniformice e ingrese al reactor. Es notoria las diferencias de velocidades del aire en el codo, ello causa que el flujo se incline en un lado u otro.

La cámara donde irán las resistencias eléctricas tiene la característica de que el aire expandirá mediante el apoyo de un deflector y tendrá un ducto que reduce su diámetro a

medida que el aire avanza a la salida para que de alguna manera se recupere la velocidad que tenía al ingresar.

**Figura 63**

*Simulaciones a la salida del reactor*



### 4.3 CFD del calentamiento de aire

El aire caliente tiene una baja humedad relativa, por lo cual si se usa para quitar la humedad de partículas tendrá más capacidad para absorberla. Un secador de lecho fluidizado tendría un plus para secar partículas mediante aire caliente y es bajo esa premisa que se realizaron simulaciones para calentar dicho gas y proponerlo en el diseño.

La energía por unidad de tiempo que se le proporcionará al aire resulta ser, por cálculos, de 3.40 kW. El aire tiene desde ya una temperatura de 30 °C en promedio a la salida del soplador y se pretende llevarlo a 70 °C como máximo. Las resistencias eléctricas de diámetros reducidos liberan potencias menores a la calculada, por lo que el número de estas variará de acuerdo con la que se elija.

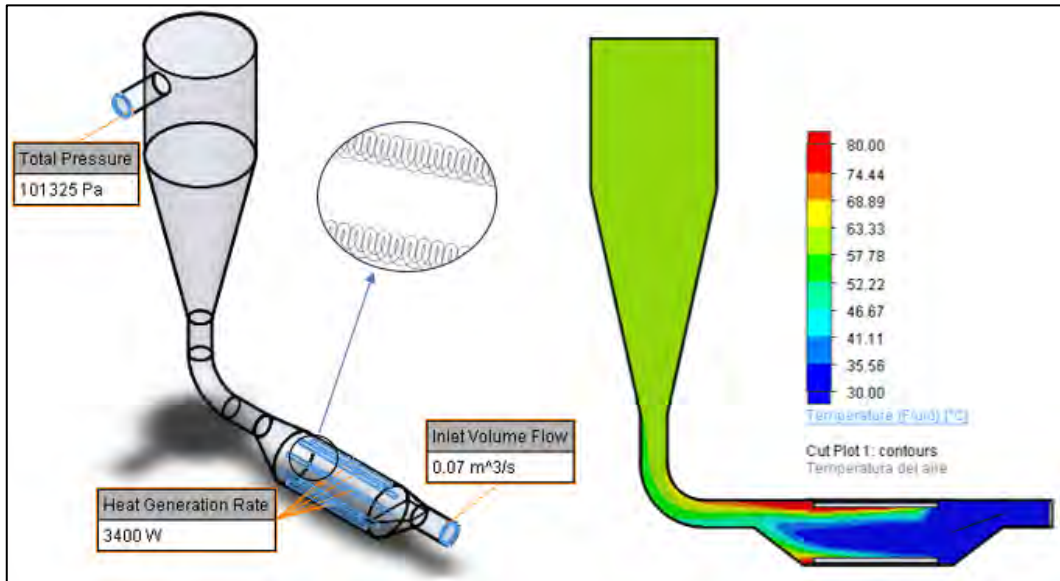
Se tienen cuatro modelos diferentes de resistencias eléctricas, para simular. En el programa se usan grados Celsius y una aleación predeterminada del *software* para la resistencia eléctrica.

#### 4.3.1 Resistencias en el contorno de la cámara

Se realiza una construcción del lecho propuesto y en el interior de la cámara se coloca ocho resistencias eléctricas. Se puede realizar la simulación con un valor mayor de potencia acumulada, pues al instalar el módulo real, estas resistencias deben llevar un circuito de control de encendido y apagado.

**Figura 64**

*Simulación ubicando resistencias eléctricas en la superficie lateral*

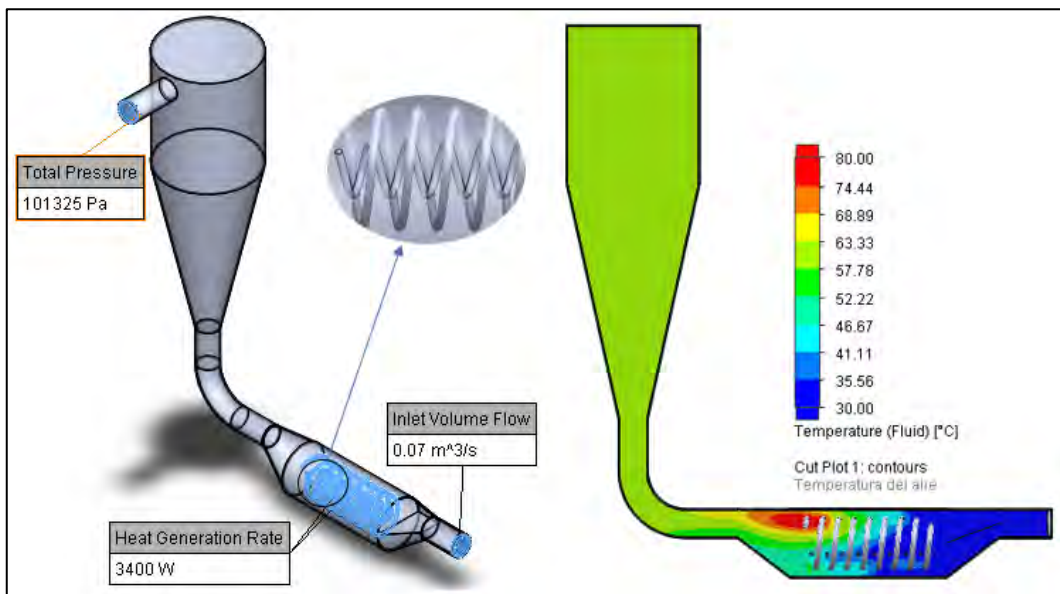


Se puede ver un calentamiento de aire cercano a  $80^{\circ}$  en la zona donde se ubican las resistencias, mientras el centro sigue "frío". Sería inoportuno colocar resistencias en ese lado, ya que la mayor parte de calor se transferirá a la estructura.

#### **4.3.2 Resistencias en arreglo tubular en el centro de la cámara**

**Figura 65**

*Simulación usando resistencias eléctricas en el centro*



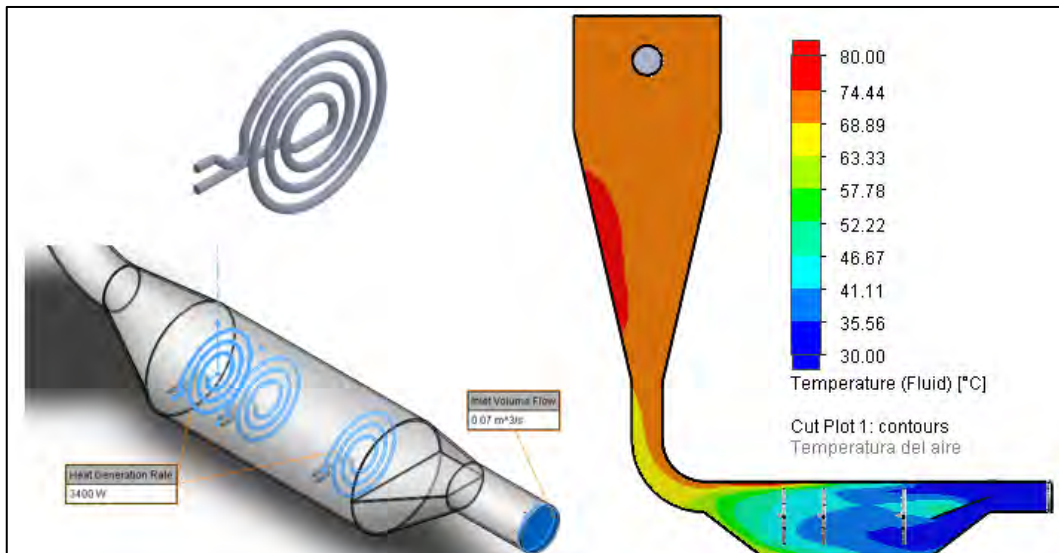
Se tiene las resistencias sin soportes aun, ya que en la parte diseño interesa el comportamiento de la parte liberadora de calor. Se ve un aumento de temperatura a lo largo

de las resistencias (ambas suman 3.4 kW), solo una zona presenta valores cercanos a 80° dentro de la cámara. Si bien la temperatura en el reactor es cercana a los 63°C, la manera de dar la forma a ese arreglo e instalarlas sería complejo.

#### 4.3.3 Resistencias en espiral distanciadas no uniformemente

**Figura 66**

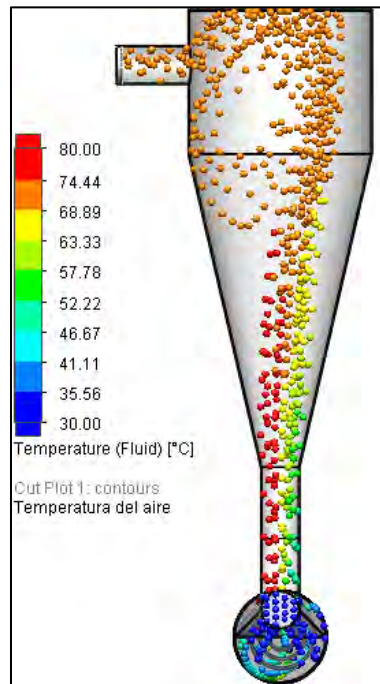
*Simulación con resistencias en espiral*



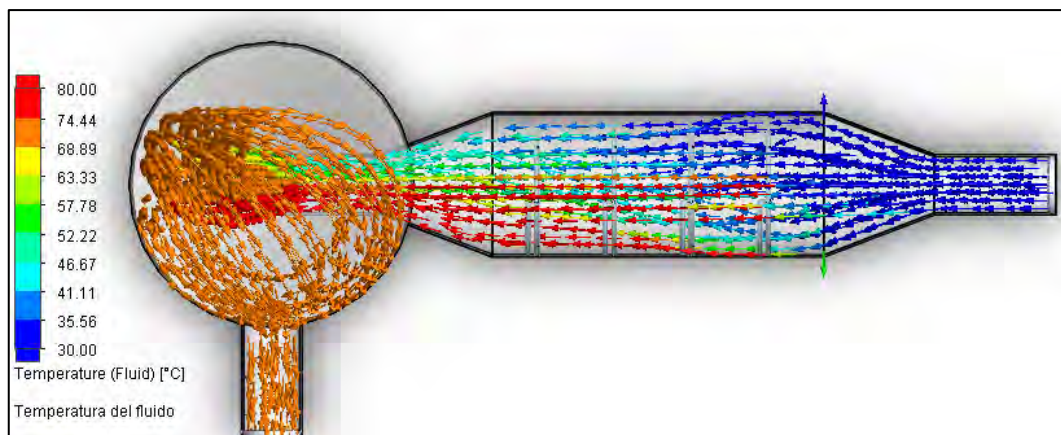
Se tuvo la idea de colocar resistencias en espiral, en principio están consideradas tres, la primera frente al deflector para apoyar con la expansión del aire y calentando con su transferencia de energía. Las dos últimas reciben el fluido expandido y su liberación de calor abarca toda el área en donde se ubican.

Según la Figura 66, la temperatura aumenta más después de pasar las dos resistencias, lo cual parecería ilógico, sin embargo, al observar una simulación con esferas (Figura 67), se revela que por la superficie lateral van corrientes con aire a 70 °C y por el centro con 46°C, entonces en el codo estas corrientes equilibran su temperatura.

Ello es causa de la velocidad no uniforme del fluido, pues después de pasar por el deflector no necesariamente lo hace con la misma velocidad en todas sus líneas de corriente, algunas van más lentas, reciben el calor cedido por las resistencias y entonces su temperatura será mayor al de las líneas de corriente que van a una velocidad mayor.

**Figura 67***Simulación con esferas***4.3.4 Resistencias en espiral distanciadas uniformemente**

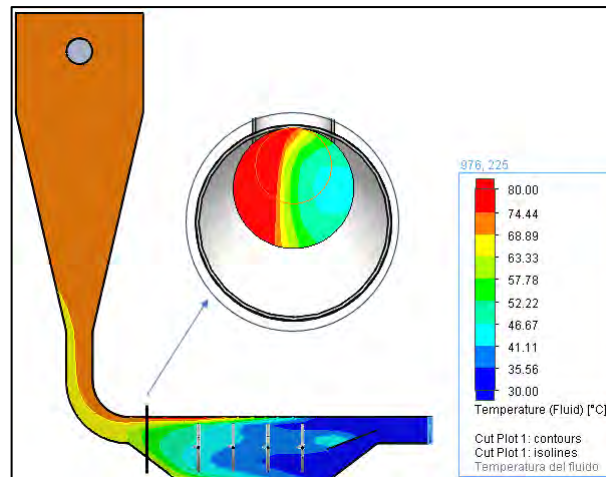
Se realiza la simulación del secador con 4 resistencias eléctricas en su interior, ello para tratar de uniformizar la temperatura del fluido. La simulación obtenida evidencia que aún existen corrientes que calientan más que otras, pero se logra calentar el aire con esa longitud de la cámara. Las resistencias en espiral no generan pérdida de velocidad debido a su parte vacía, por ello resulta la mejor opción para lograr el objetivo.

**Figura 68***Vista superior de las corrientes de aire*

Se puede rescatar que el colocar otra resistencia y juntas liberen la misma potencia que en el caso anterior colabora solo en la uniformidad del calentamiento del aire y es favorable colocar cuatro, porque las resistencias de este tipo liberan máximo 900 W cada una.

**Figura 69**

*Vista perpendicular al ingreso del codo*

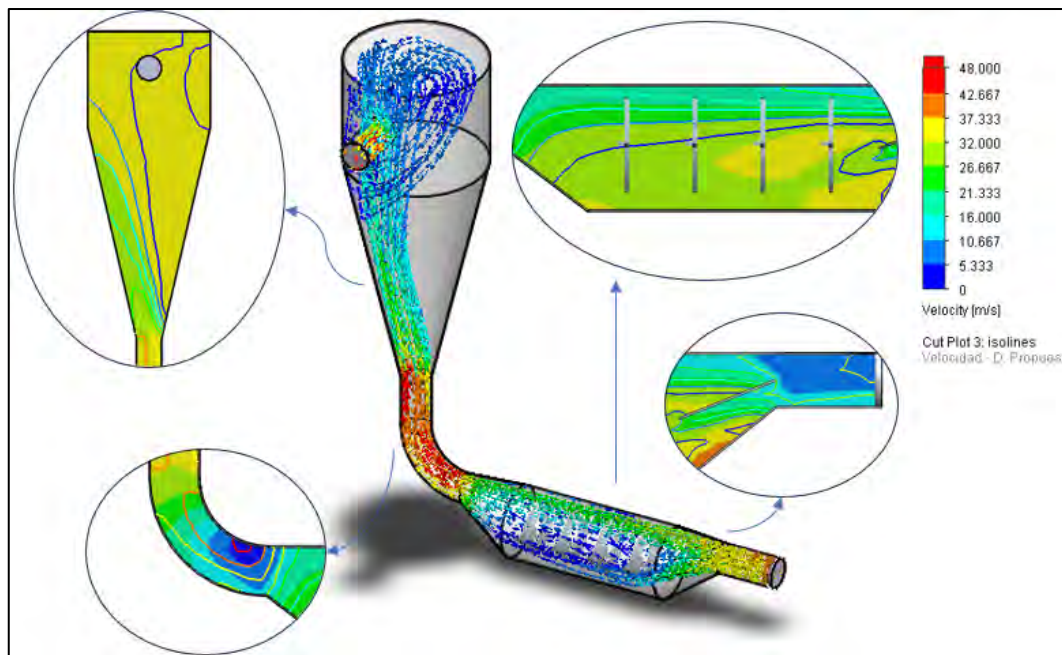


#### 4.4 Flujo de aire en el secador propuesto

Se presentan las simulaciones del flujo de aire en todo el secador propuesto, incluyendo las resistencias eléctricas elegidas.

**Figura 70**

*Flujo de aire en todo el secador*



El lecho donde descansarán los granos de café está 5 cm por encima del área donde inicia el reactor, algo que se decidió durante la parte experimental, en esa zona el perfil de velocidades se muestra según la Figura 71. El lecho será de una malla de material galvanizado, cuyas perforaciones son cuadradas de 0.5 mm de lado, y los alambres separadores son relativamente finos, por lo que ella no representaría una resistencia al paso del aire.

**Figura 71**

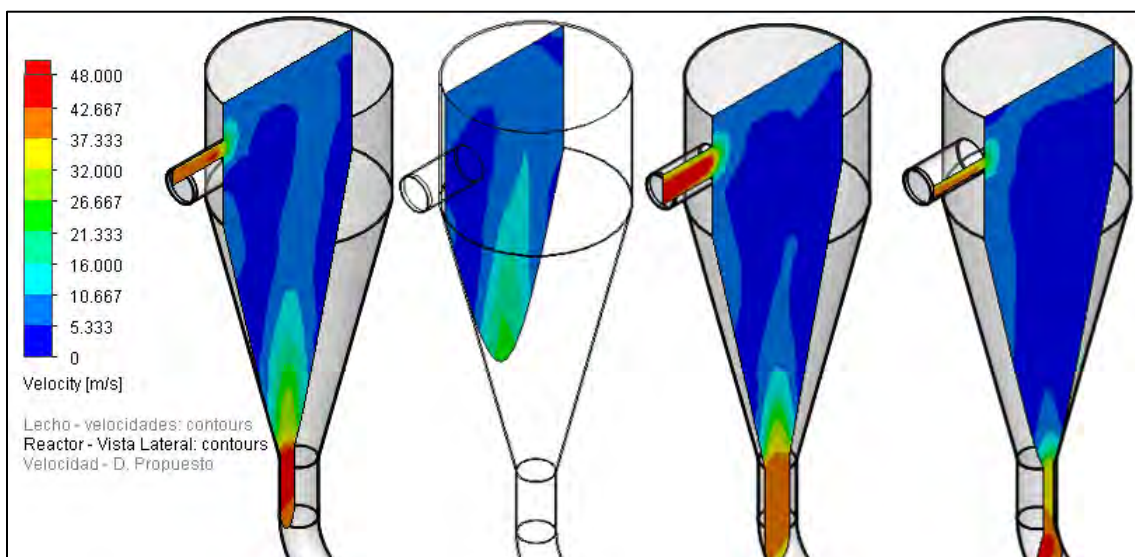
*Perfil de velocidades en el lecho*



En el reactor, es interesante observar el comportamiento del flujo, ya que es una zona relativamente ancha a comparación de las tuberías por donde se conduce el aire. En las zonas donde la simulación no muestra flechas o es azul, la velocidad del aire es baja. En la Figura 72 se han tomado recortes en la vista lateral del comportamiento del flujo.

**Figura 72**

*Mapa de velocidades en el reactor*



Se puede rescatar que hay zonas distinguidas en cuanto a la fluidización, la corriente de aire en el centro del reactor tiene un gradiente de velocidad que disminuye a medida que se avanza verticalmente hacia arriba, ello porque el flujo de aire está tendiendo a adherirse a la pared del reactor, lo cual se puede ver en el reactor que no tiene color superficial (Figura 72), donde la velocidad de aire cerca a la pared está en un rango de 16 a 25 m/s.

#### 4.5 Dimensionamiento del prototipo

En esta sección se resumen las dimensiones a las que se diseñará el reactor, ya considerando la cámara de calentamiento de aire. Mediante los planos de croquis se mostrarán las dimensiones.

En este diseño se hicieron las simulaciones necesarias para ir determinando la forma del secador de lecho fluidizado. El tubo de 2" de diámetro desde la salida del soplador hacia la cámara mide 150 mm (referenciado como tubo A), esta última se compone por dos troncos de cono con altura de 100 mm, diámetro de base menor igual a 2" y el de la base mayor es de 6". Este diámetro en principio se prefería que sea de 5", pues según simulación la turbulencia tenía mejor comportamiento, pero la temperatura del aire a la salida no llegaba a 70°C y sumado a ello las resistencias en espiral cotizadas tienen un diámetro de 130 mm.

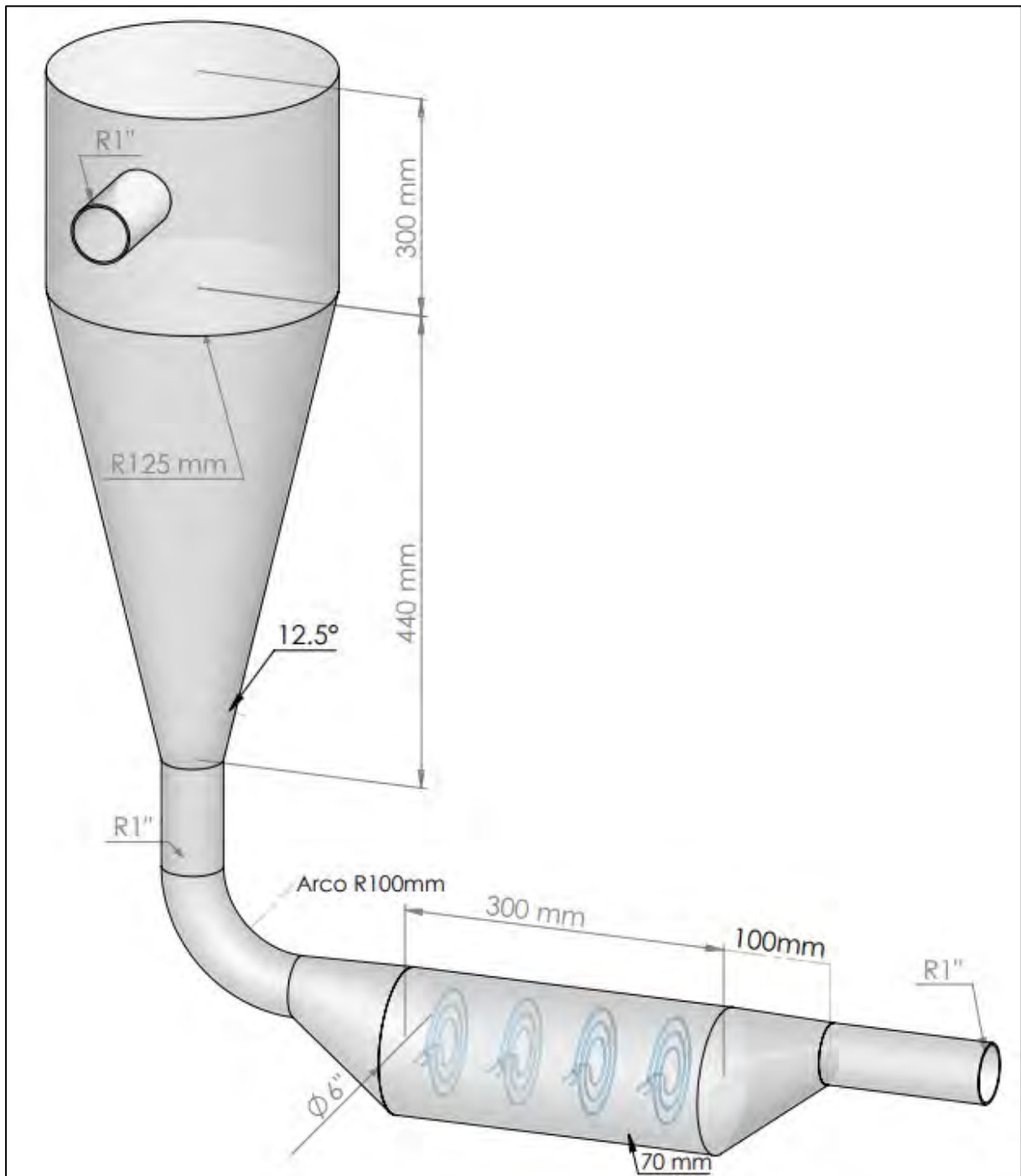
El codo de 2" de diámetro, radio de 100 mm tendrá que enviarse a fabricar, tal como se hizo en el prototipo UDEP. El reactor cónico tiene 25° de abertura y el diámetro de la base mayor, parte superior, es de 250 mm. Con esa forma y la altura de 440 mm tendrá volumen suficiente para almacenar como máximo 5 kg de café pergamino. A la salida del reactor ira una tapa en forma cilíndrica como complemento del proceso, pues se necesita volumen para que los granos floten en el fenómeno de la fluidización. La tapa es de 300 mm de altura y debe contener un agujero de 2" para la salida del aire húmedo, agujero que tiene un tubo de 100 mm de largo.

Las resistencias eléctricas en espiral tienen dimensión de 130 mm como diámetro máximo y liberan 900 W de potencia, la cual se puede controlar. Se ha hecho un arreglo de 4 resistencias equidistantes 70 mm dentro de la cámara. La primera de ellas dista 20 mm del deflector.

En base al diseño se procede a crear las piezas por separado, éstas se unirán mediante bridas. La tapa debe contener asas y los pernos de sujeción entre este y el reactor deben ser tipo mariposa pues no hay que olvidar que los granos de café deben introducirse y retirarse de alguna manera al reactor y será por este medio.

Se prevé que dos sean los puntos de apoyo del equipo a la superficie, el primero debe estar en el tubo después del soplador y el segundo en el reactor. La cámara será sujeta por el codo y el tubo A, no tendrá apoyo por el hecho de que cerca ella existiría un módulo de control para las resistencias y un posible recubrimiento para evitar pérdidas de calor al ambiente.

Figura 73

*Secador dimensionado*

## Capítulo 5

### Resultados

#### 5.1 Resumen de resultados para fluidizar diferentes masas de café

Es necesario contar con la construcción del presente diseño para saber la frecuencia a la que trabajaría el motor que fluidice una masa en particular. Se ha entendido durante el proyecto que no hay una fórmula que garantice la velocidad a la que debe ir el fluido para justamente fluidizar una determinada masa de granos. Se cree que las velocidades necesarias variarán según el secador que se utilice, en este caso se diseñó para fluidizar 5 kg de café, trabajo que se pudo comprobar adaptando una forma cónica en el prototipo de UDEP.

Lo que se ha visto es que manteniendo el parámetro de frecuencia en el motor y disminuyendo la masa de café a 4 kg, la fluidización se ve como un proceso más notorio, quizás por el mayor espacio libre que tienen los granos. Según ello, se puede dejar rangos de velocidades en el reactor, para que cuando se experimente con masas menores a 5 kg, puedan variar la frecuencia y mantener el efecto de fluidización, quiere decir que, a menos masa de café, el motor puede cumplir el objetivo a una menor frecuencia.

#### Figura 74

*Fluidización de 5 kg de café pergamino*

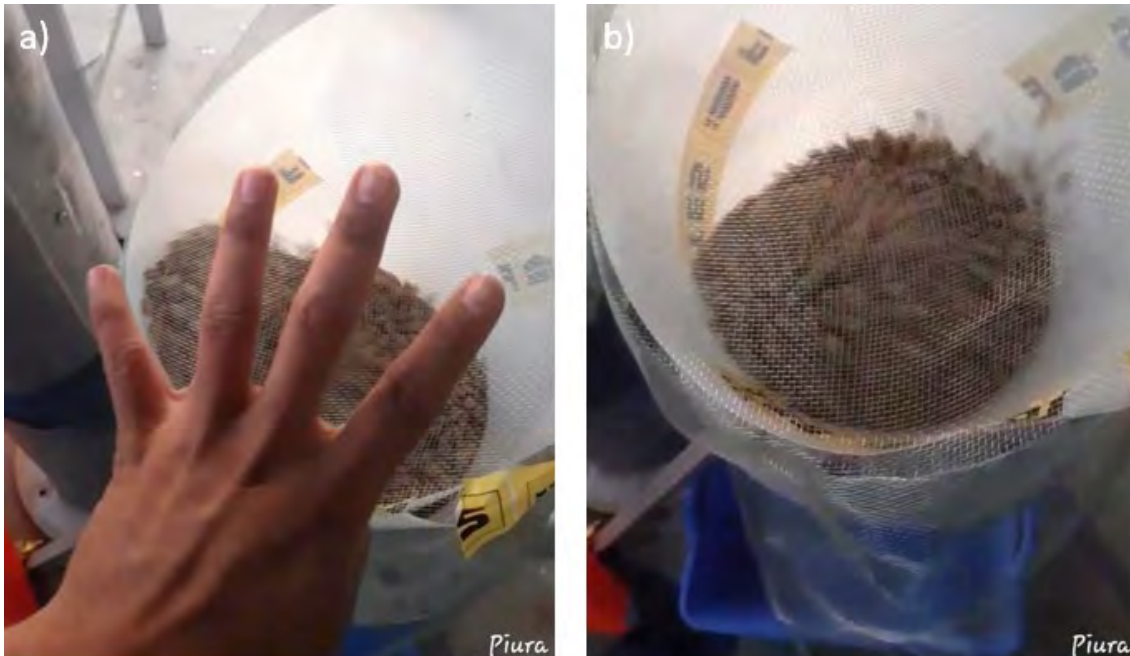


Según la Tabla 4 se harán simulaciones en un paramétrico para observar la magnitud de velocidades justo en el lecho, dejando claro que el flujo volumétrico es el dado por el soplador. Como en el lecho la velocidad no es constante se puede tomar un promedio. Lo que se puede determinar según el paramétrico para los tres primeros valores de flujo volumétrico

de aire es que, por la zona del lecho, la velocidad está entre 21 y 26 m/s, mientras que para los dos últimos valores la velocidad fluctúa entre 10 y 21 m/s.

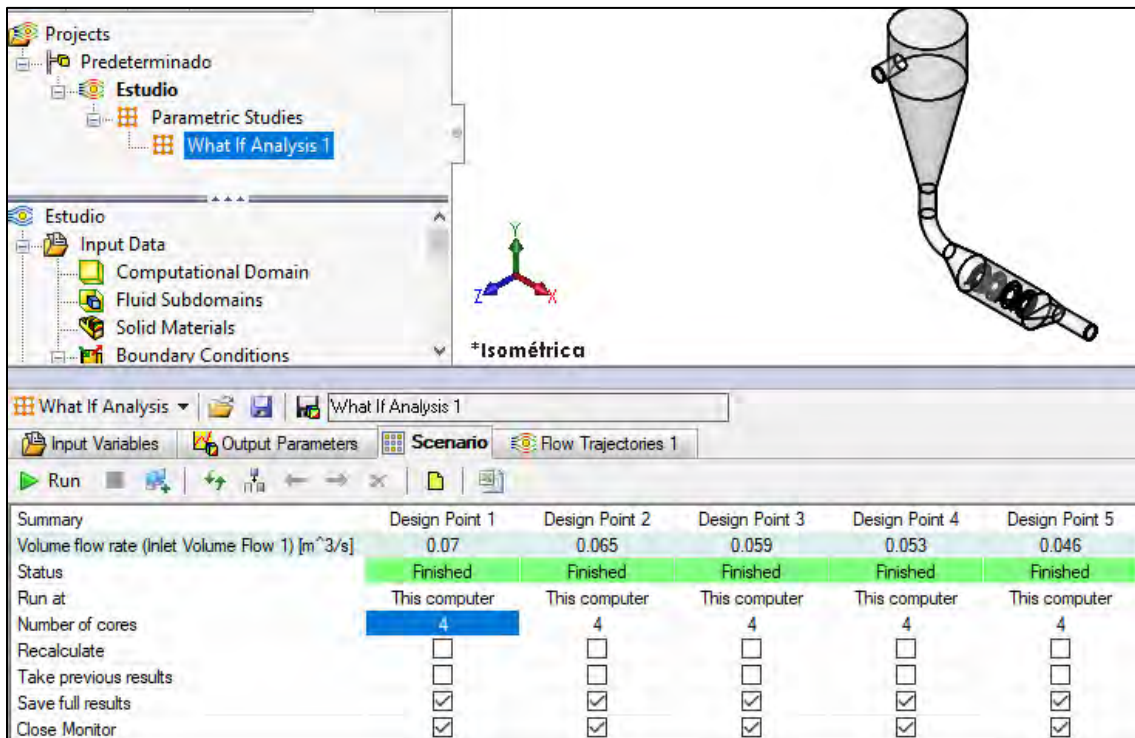
**Figura 75**

*Fluidización de 4 kg de café pergamino*



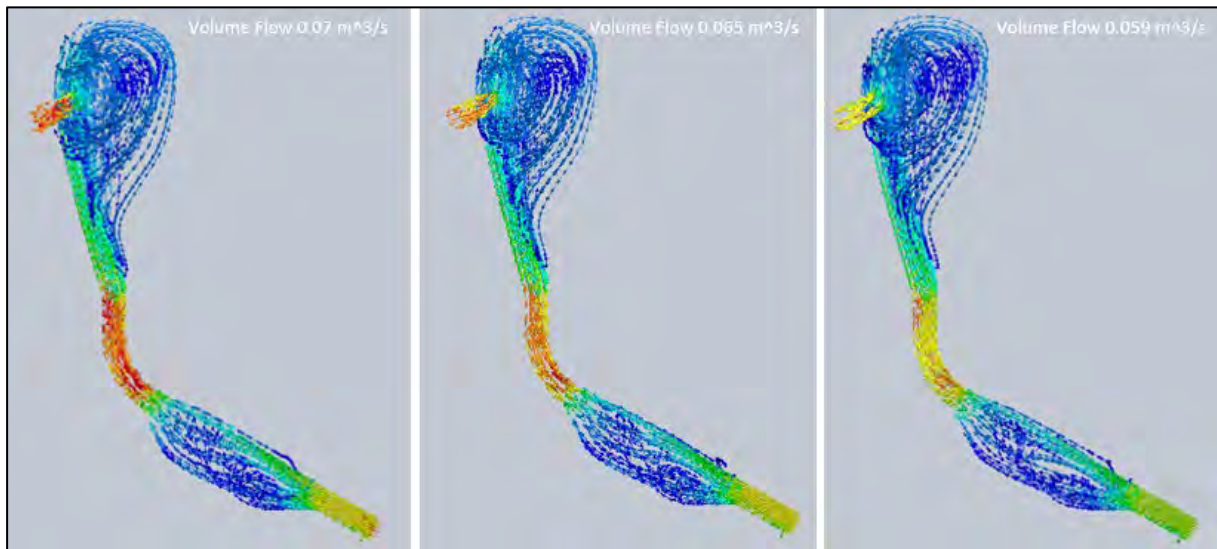
**Figura 76**

*Estudio paramétrico de flujo de velocidad*

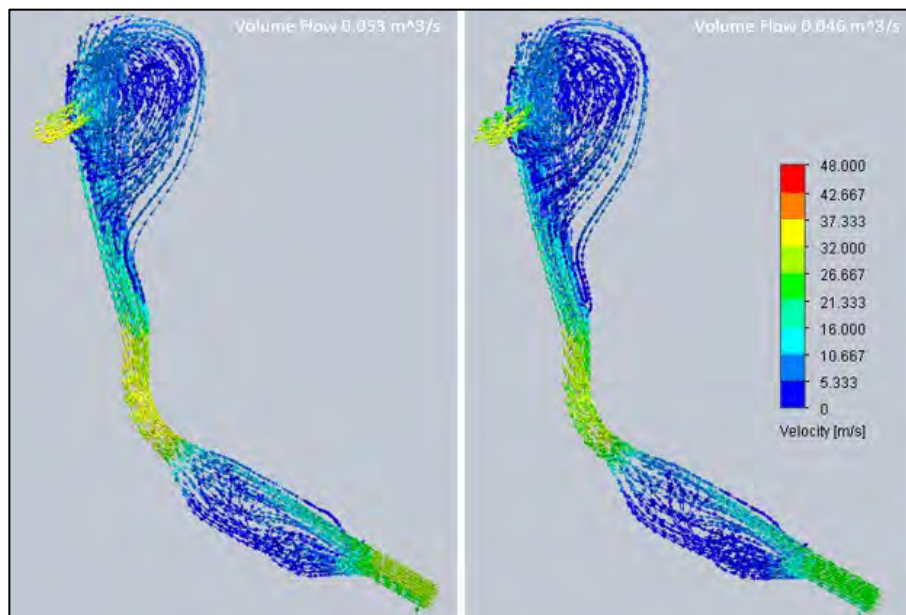


**Figura 77**

*Flujo en el secador para 60, 55 y 50 Hz en el motor del soplador*

**Figura 78**

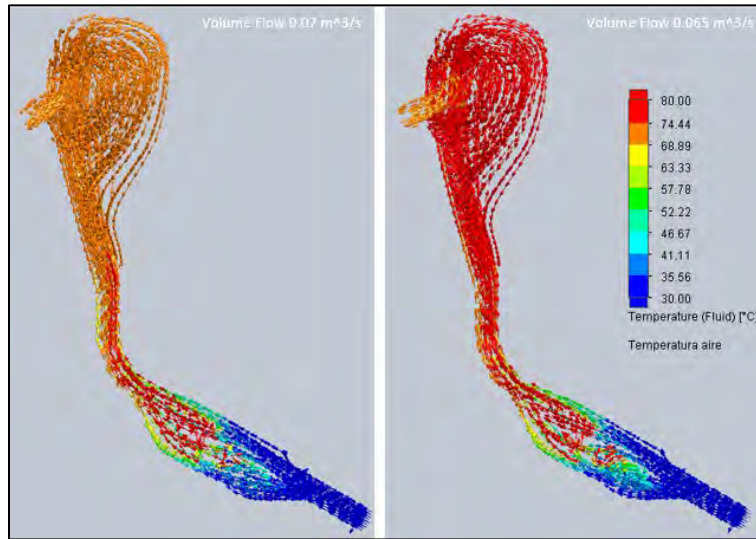
*Corrientes de aire en el secador para 50 y 45 Hz*



Realizando un nuevo paramétrico para la temperatura del aire se rescata principalmente que, ante una disminución de la velocidad del fluido, este absorberá más calor. Por ello es importante la implementación de un control *on off* de las resistencias eléctricas. En la Figura 79 se evaluó el cambio de temperatura con dos condiciones de frontera diferentes, concluyendo que, disminuyendo la frecuencia en 5 Hz, la temperatura aumenta en aproximadamente 10 °C.

**Figura 79**

*Temperatura del fluido variando condición de frontera*



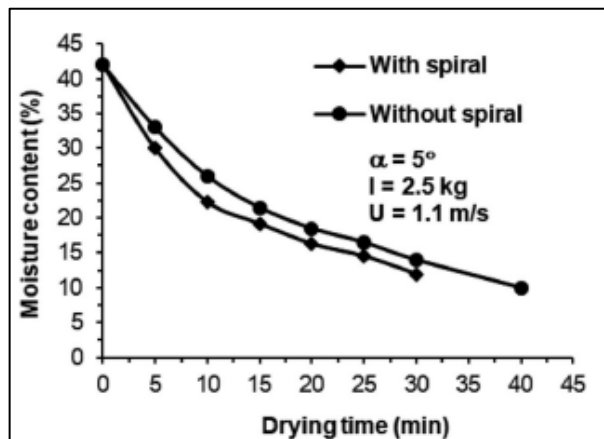
## 5.2 Estimación del proceso de secado

Las fuentes bibliográficas brindan datos exactos para el secado de sus productos, tomando como final de referencia humedades relativas entre 12 y 14%. Construyen curvas de secado cuyas variables son tiempo y humedad relativa, la cual obtienen pesando la muestra en cada toma de datos.

Las curvas de secado que presentan tienen de ordenada al contenido de humedad (%) y de abscisas al tiempo (min). En la figura se muestra un ejemplo del trabajo hecho por (Hirakh et al., 2020), notando dos secciones. La primera tiene una caída rápida (0 a 15 min), mientras que después de 20 minutos la curva decrece a menor medida respecto al tiempo.

**Figura 80**

*Curvas de secado usando reactor cónico*



*Nota.* Obtenido de (Hirakh et al., 2020).

Las curvas pueden generarse a partir de datos obtenidos en un experimento que consiste en anotar el cambio de masa a medida que pasa el tiempo, pero también se pueden estimar. (Tecante, 2010) menciona que son 4 las regiones en una curva de secado, sin embargo, para la estimación de una curva se puede encontrar el modelo matemático de dos de las regiones, periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente.

Se tiene un valor, según la ecuación 9 al que se le llama *flux* y representa la velocidad de secado por unidad de área. Este valor será único en la zona de velocidad constante y variable en la otra región.

Para el periodo de velocidad decreciente en manera constante se dan las condiciones de tiempo inicial a 0 y humedad igual a “ $h_1$ ”, mientras que para el final son  $t_c$  y  $h_2$  (mayor que la humedad inicial) respectivamente, y se obtiene la ecuación 10.

$$R_c = \frac{-m_{SS}}{A} * \frac{dh}{dt} \quad (9)$$

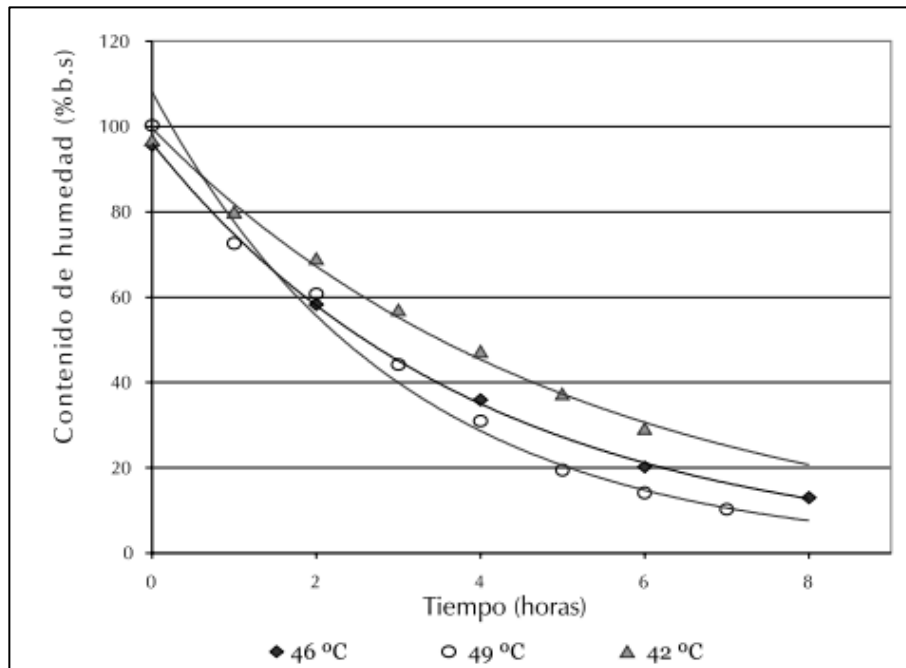
$$t_c = \frac{m_{SS}}{R_c * A} (h_1 - h_2) \quad (10)$$

$$t_d = \frac{m_{SS}}{A} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{R_d} \quad (11)$$

Para la región de velocidad decreciente (d) se obtuvo la integral debido a que el *flux* depende de la humedad en forma de ecuación. Resolver la ecuación 11 brindaría la curva de manera estimada.

Para el café pergamino se tiene 5 kg a una humedad del 56% que se pretende llevarla al 14%, usando aire caliente a 70°C como máximo y una velocidad de mínima fluidización cercana a 19 m/s. La fuente bibliográfica más cercana es de (Lopez C. , 2021), quien estima un valor de 6 horas para pasar de 55% a 12% la humedad relativa en base húmeda del café pergamino. En la 18% en base seca usando aire a 49 °C.

Figura 81 se observan tres curvas, donde se llega más rápido a la humedad de 18% en base seca usando aire a 49 °C.

**Figura 81***Curvas de secado de café pergamino*

*Nota.* Adaptado de (Lopez C. , 2021).

### 5.3 Resumen de materiales para el calentamiento de aire

Para la construcción de la cámara se deben mantener las 6" de diámetro interior, sin embargo, las elevadas temperaturas que habrá a causa de las resistencias eléctricas implican que se coloque una capa de 20 mm de material refractario como el cemento castable, el cual resiste hasta 1260 °C y se puede manipular. Otra alternativa es enviar a construir este molde, considerando los agujeros para el paso de los cables y la alternativa propuesta es en SCHEMIN PERÚ S.A.

El contorno de la cámara será de acero inoxidable, el diámetro es comercial y se puede encontrar en 3A AMSEQ en la ciudad de Piura. En cuanto a los troncos de cono adheridos a la parte cilíndrica se tendrá que recortar material según la Figura 82 y darles la forma.

La resistencia eléctrica es una espiral que generalmente se ve en las cocinas eléctricas, de ahí la idea, pues se veía complicado instalar niquelinas a lo largo de la cámara y evitar que sean obstáculos al paso del aire, además son muy maleables y se necesitaba de muchas sujeciones. Las resistencias fueron cotizadas por el proveedor "Maxwell Controls", cuentan con 130 mm de diámetro y una potencia máxima de 900 W.



#### 5.4 Resumen de materiales para el secador

Para construir el complemento a lo antes descrito es necesario contar con materiales según la Tabla 6.

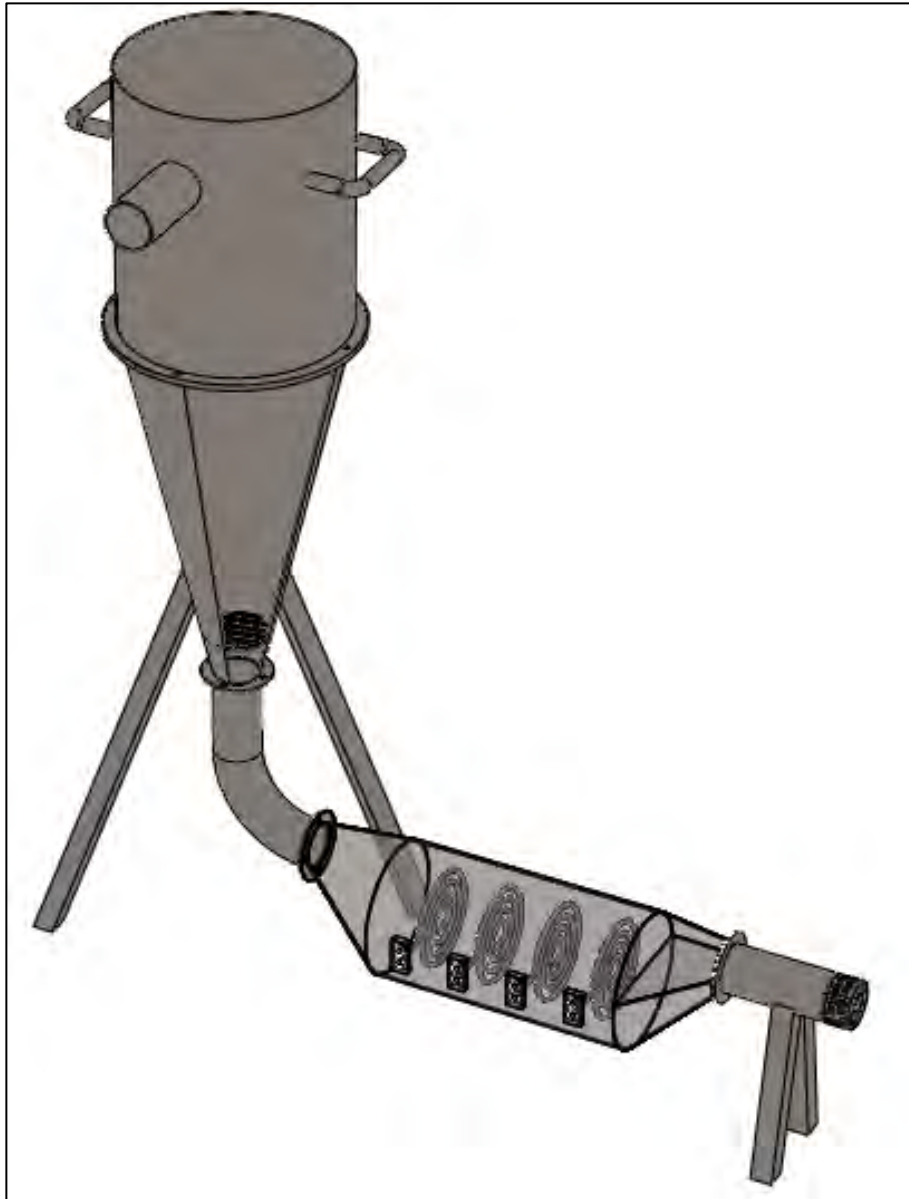
**Tabla 6**

*Resumen de material para construir el secador*

Material	Cantidad	Referencia
Tubo cuadrado de 1"	2.20 m	Para pies de apoyo
Tubo redondo D2"	0.350 m	Para salida de blower, zona previa al cono y salida.
Plancha de acero	1200X2400X2 mm	Rolado de cono reactor
		Tapa del <i>blower</i>
		Bridas
		Deflector
Pernos 3/8 x 1" con tuerca normal.	30 u	Ajuste de bridas
Pernos 3/8 x 1" con tuerca mariposa.	8 u	Ajuste de brida en tapa del secador
Malla alambre galvanizado 0,5 mm	Circular de 2.5" de diámetro	Lecho de granos
Silicona	560 mL	Para rellenar entre unión de piezas

Se puede iniciar la construcción de las piezas en los laboratorios de la universidad, sin embargo, dentro del marco del proyecto se pudo enviar a cotizar la construcción de este prototipo a un servicio tercero.

Los planos generales de diseño se presentan en los anexos, cada pieza que formará parte del reactor se construyó por separado en el *software* para obtener su plano correspondiente. La vista general se muestra en la Figura 84, donde tiene un corte para poder observar el lecho.

**Figura 84***Vista general del ensamblaje*

## Conclusiones

Se cumplió el objetivo de proponer un secador de lecho fluidizado teniendo de comportamiento más próximo las simulaciones realizadas.

Se concluye que los diseños de secadores de lecho fluidizado para una masa determinada no se pueden extrapolar para otra aplicación.

La inclinación de un reactor cónico fue la clave para lograr fluidizar una masa de 5 kg de café, se puede concluir que la inclinación genera un ahorro energético, pues sería necesario mayor potencia para fluidizar tal masa de café en un reactor cilíndrico.

Las resistencias eléctricas en espiral resultaron ser más ventajosas de utilizar por su estado bastante sólido y espacios para permitir fácilmente la circulación del aire.

Un lecho de diámetro cercano a 2" mantiene el empuje ofrecido por el soplador, parte del proyecto UDEP y puede utilizarse para fluidizar 5 kg de café pergamino.



## Recomendaciones

Se recomienda que la tapa superior tenga empaquetaduras para asegurar que no haya fugas de aire, la forma que se le ha dado cierra de tal manera que esas fugas no se den, pero al tener que maquinar, la curvatura no será del todo precisa.

Se recomienda obtener las curva de secado una vez ensamblado el prototipo en campo para verificar la efectividad del secador.

Se recomienda evaluar el comportamiento en el diseño teniendo la cámara de calentamiento previa al soplador.



## Referencias

- Cabanillas, A., & Rodas, G. (2023). *Diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado*.
- Cabanillas, A., & Rodas, G. (2023). *Diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado*.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicacióne*.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*.
- Conesa, J. (2010). *Reactores de lecho fluidizado*. España.
- CONICET. (2013). *Conicet Bahía Blanca*.  
<http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo5.pdf>
- De Prada, A. (2014). *Estudio experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizado*.
- García, K., & Mercedes, Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado*.
- González, L. (2014). *Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado*.
- González, L. (2014). *Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hirakh, D., Rituraj, S., & Nit, P. (2020). Effects of spiral and cone angles on drying characteristics and energy consumption of fluidized paddy dryer. *Drying Technology*, 1, 14. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.18325212>
- Hirakh, J., Rituraj, S., & Pinakeswar, M. (2020). Effects of spiral and cone angles on drying characteristics and energy consumption of fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1832512>
- Jaramillo, A., & Narváez, E. (2012). *Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización*. Ecuador.
- Lopez, C. (2021). Caracterización física y factores de conversión de café especial en Bolivia. *Investigación en innovación agropecuaria y de recursos naturales*. <https://doi.org/10.53287>
- Lopez, E. (2006). Secado de café en lecho fluidizado. *ResearchGate*, 6. <https://doi.org/10.15446>
- Lopez, O. (2023). *Análisis energético comparativo de un secador solar para café de tipo invernadero en convección natural vs convección forzada*.

- MINAGRI. (2018, marzo 19). *Ministerio de desarrollo agrario y riego*. [www.minagri.gob.pe:https://www.midagri.gob.pe/portal/noticias-anteriores/notas-2018/21141-entregan-maquinas-despulpadoras-a-productores-de-cafe](http://www.minagri.gob.pe:https://www.midagri.gob.pe/portal/noticias-anteriores/notas-2018/21141-entregan-maquinas-despulpadoras-a-productores-de-cafe)
- Montilla, J., Arcila, J., Aristizabal, M., & Montoya, E. (2008). Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. *CENICAFE*.
- Nazghelichi, T., Hossein, M., & Aghbashlo, M. (2010). Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *ELSEVIER*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.036>
- Orrego, D., Prada, O., Sanchez, L., Cavallito, S., & Zapata, A. (2012). Fermentación alcohólica del mucílago del café. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*.
- Poornachandra, M., Harikrishna, T., Anand, R., & Prashanth, S. (2021). *Design of fluidized bed dryer*.
- Prasanta, M., Bachu, D., Rajat, G., & Shyam, S. (2022). *A comprehensive review of fluidized bed drying*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2017). *Línea de Base del sector café en el Perú*. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.
- Reyes, A., Mahn, A., Guzmán, C., & Antoniz, D. (2012). Analysis of the Drying of Broccoli Florets in a Fluidized Pulsed Bed. *Drying Technology*, 10. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.686548>
- Solidaridad South América. (2017). *Manual de caficultura climáticamente inteligente*. Biblioteca Nacional del Perú.
- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., & Wetchacama, S. (2000). Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of stored products research*(37(2001) 133-151), 19.
- Tecante, A. (2010). *Wordpress*. Retrieved enero 22, 2024, from <https://kardauni08.files.wordpress.com/2009/03/secado.pdf>
- Unigarro, D. (2017). *Secado de café arábigo Coffea arábica de la ariedad caturra mediante lecho fluidizado*. Ibarra, Ecuador.

Anexos

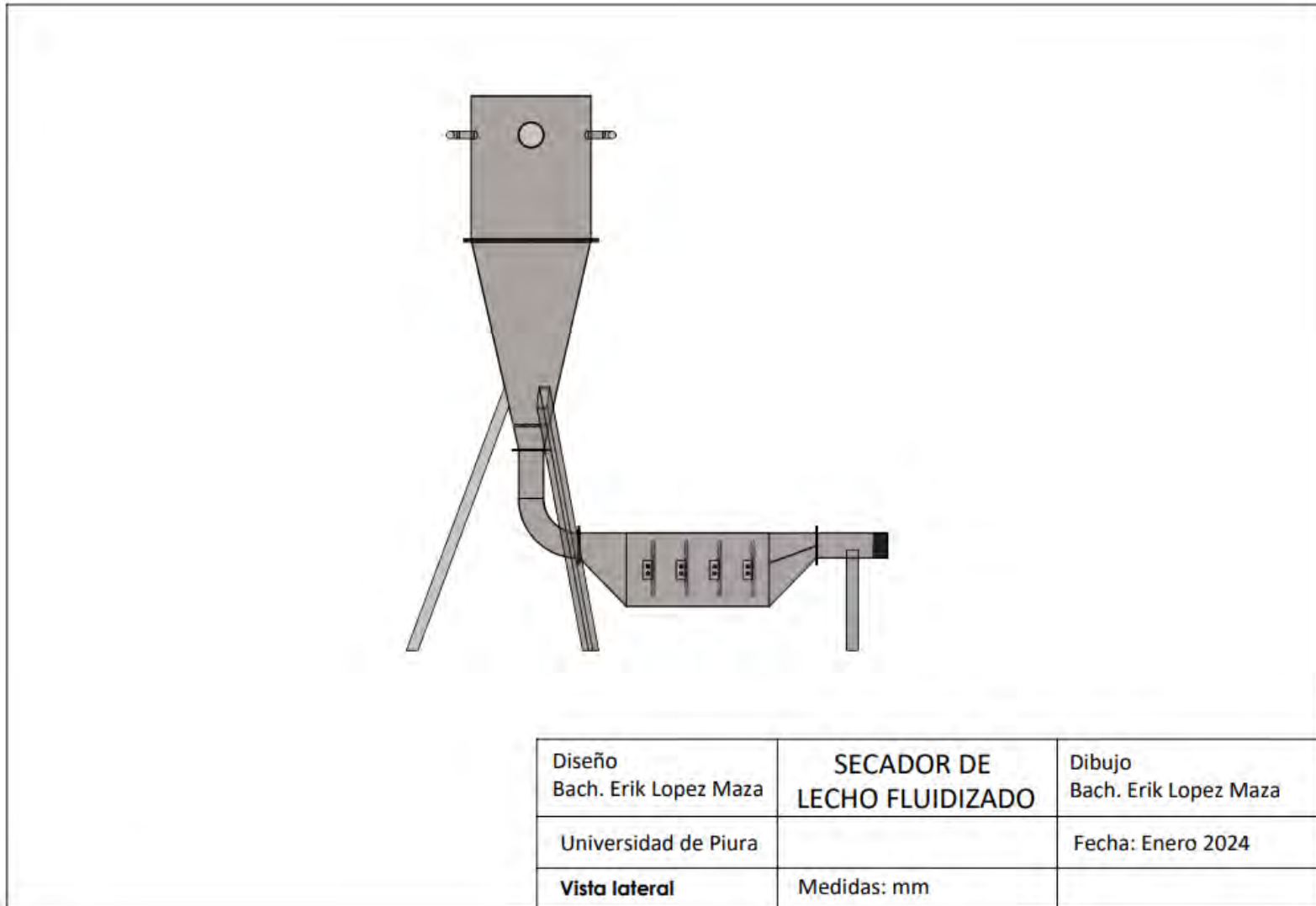


## Anexo A Ensamble general



Diseño Bach. Erik Lopez Maza	<b>SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO</b>	Dibujo Bach. Erik Lopez Maza
Universidad de Piura		Fecha: Enero 2024
Ensamble general	Medidas: mm	Acero inox AISI 316L

## Anexo B Vista lateral del ensamble

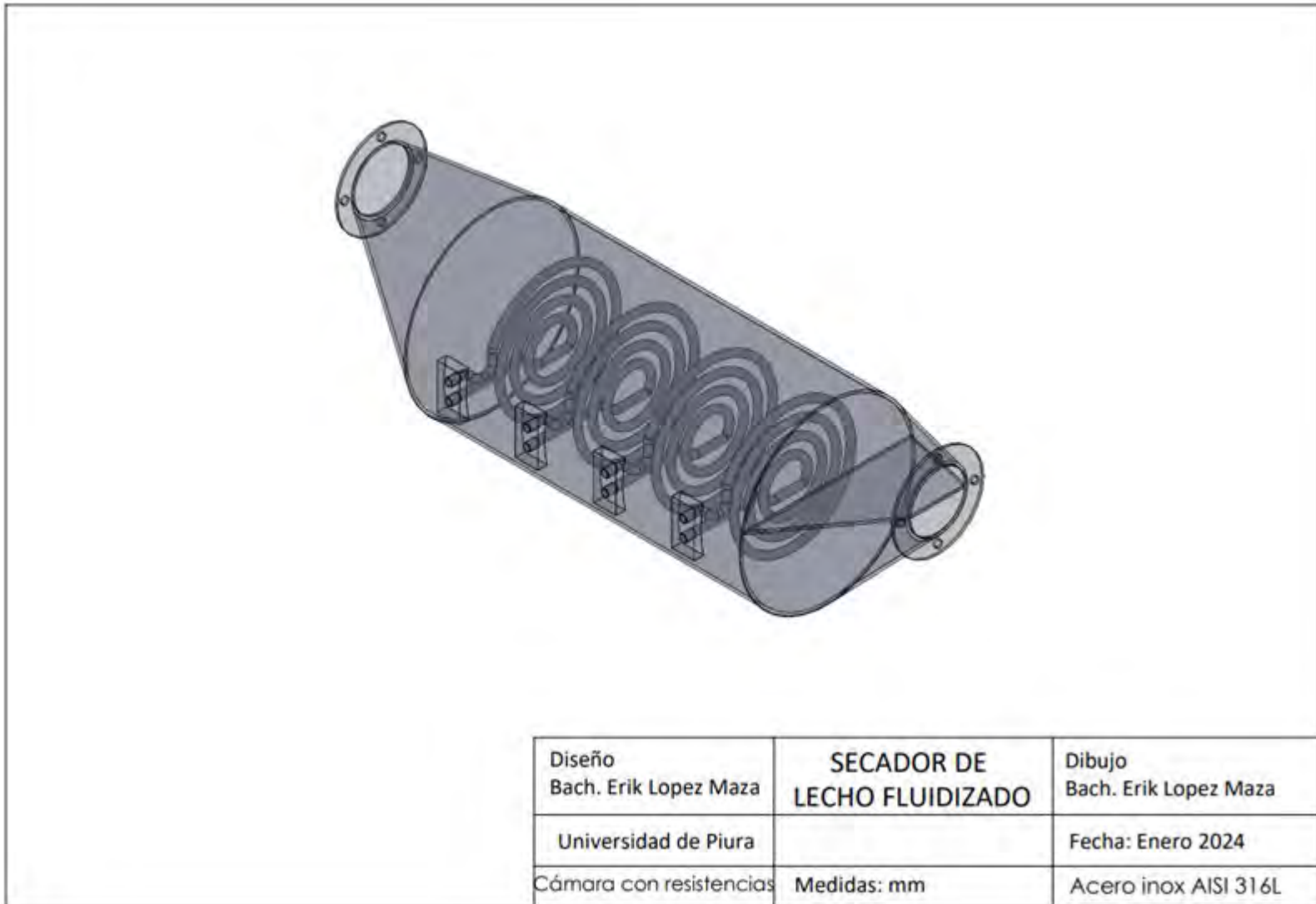


### Anexo C Resistencia eléctrica escogida



Resistencia en espiral de 130 mm de diámetro mayor, cotizada por un proveedor.

Diseño Bach. Erik Lopez Maza	<b>SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO</b>	Dibujo Bach. Erik Lopez Maza
Universidad de Piura		Fecha: Enero 2024
Resistencia 1 de 4	Medidas: mm	Material: Aleación.

**Anexo D Ubicación de resistencias eléctricas**

Anexo E Plano del lecho de granos

