FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado

Trabajo de Investigación para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y Mantenimiento

Aldo Fabián Cabanillas Valle
Guillermo Rodas Carhuajulca

Asesor:
Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares

Piura, marzo de 2023

NOMBRE DEL TRABAJO

v11 Diseño de un prototipo de deshidratador.docx

Raúl La Madrid
43356179

RECUENTO DE PALABRAS

9724 Words

RECUENTO DE CARACTERES

51397 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

71 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

13.6MB

FECHA DE ENTREGA

Feb 25, 2023 4:28 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Feb 25, 2023 4:29 PM GMT-5

22% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base d

- 19% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 16% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente

Dedicatoria

A Dios, por iluminarme día a día y guiarme en el buen camino para seguir adelante.

A mi padre Silvestre, quien fué un gran ejemplo de trabajo, de superación con ingenio y responsabilidad permanente.

A mi madre Rosa, quien siempre me brinda palabras de aliento y su amor incondicional.

A mis hijas Adriana y Sofía, quienes son mi energía diaria.

A mi esposa Patricia, mi compañera de proyectos y aventuras, por su apoyo constante.

Aldo Fabián Cabanillas Valle

A Dios, en agradecimiento a todo lo logrado estando siempre presente en mis acciones.

A mis padres Martha y Fernando, que gracias a su esfuerzo y dedicación lograron hacer ser de mí el profesional que soy.

A mi esposa Aurentina, que con su paciencia y comprensión me apoya y motiva en el proyecto de vida que tenemos juntos.

A mis hijos Guillermo y Braulio, cuyo crecimiento y desarrollo me hacen esforzarme y crecer como persona y padre.

Guillermo Rodas Carhuajulca

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Agradecimientos

El presente estudio se realizó como parte del proyecto de investigación aplicada "Innovación en la operación de secado a través del diseño y automatización de un secador por convección intermitente y su acoplamiento con la Tecnología de Descompresión Instantánea Controlada (DIC) para la valorización sostenible de productos agrícolas de Piura" financiado por PROCIENCIA - Contrato N° PE501079739-2022, Esquema Financiero E041-2022-02.

Agradecemos al Mgtr Ing. Jorge Yaksetig y a los profesores de la universidad que permitieron hacer posible este trabajo.

Agradecemos al Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo, por darnos las facilidades en el uso de las instalaciones del laboratorio para los ensayos respectivos de nuestro prototipo de secador, que esperemos contribuya a estudios posteriores de lecho fluidizado.

Así mismo agradecemos al Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares por su dedicación y apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo de investigación.

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Resumen

El presente trabajo de investigación presenta el diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado para lo cual nos propusimos los siguientes objetivos:

- El diseño de un prototipo de deshidratador de café en lecho fluidizado.
- Analizar parámetros de funcionamiento de un prototipo de deshidratador.
- Elaboración de un presupuesto de construcción de un equipo deshidratador.

Para lograr estos objetivos desarrollamos los siguientes capítulos:

En el capítulo 1. Presentamos el negocio del café en Perú, con enfoque en el proceso y tipos de secado. Así mismo se referencia las características técnicas de los secadores de lecho fluidizado. Terminando en revisar la bibliografía respecto al fenómeno de fluidización; evaluando sus ventajas y desventajas.

En el capítulo 2. Revisamos la referencia de conceptos y conocimientos de la comunidad científica para entender desde el punto de vista de ingeniería el componente a fluidizar "grano café arábigo"; y los fenómenos físicos presentes en una fluidización, caracterizado por la caída de presión y la velocidad de mínima fluidización.

En el capítulo 3. Desarrollamos cálculos para determinar las características de nuestro café a ensayar, los parámetros del lecho de fluidización. Logrando el diseño y selección de los componentes de nuestro secador prototipo. Posteriormente realizamos un ensamble considerando los instrumentos de medición.

En el capítulo 4. Se realizó un trabajo de campo, con lo que se consigue la operatividad de nuestro secador prototipo. Se presenta el desarrollo de pruebas experimentales, con un resumen de los resultados. Así mismo mostramos el presupuesto de nuestro trabajo de investigación.

Concluimos en que se logró los objetivos del presente trabajo de investigación, concretamente en que tenemos un prototipo de secador de café de lecho fluidizado operando.

Recomendamos, continuar con el desarrollo de trabajos de investigación que complementen el presente prototipo de secador de café.

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Tabla de contenido

Introducción 15

Capítulo 1 Marco teórico 17

1.1 Antecedentes 17

1.2 Secado 18

1.2.1 Proceso de secado 18

1.2.2 Tipos de proceso de secado 20

1.3 Secadores de lecho fluidizado 22

1.3.1 Tipos de secadores de lecho fluidizado 23

1.4 Fenómeno de fluidización 26

1.5 Ventajas y desventajas de la fluidización 27

Capítulo 2 Parámetros de diseño de un secador de lecho fluidizado 29

2.1 Propiedades del producto a ser secado 29

2.1.1 Esfericidad de la partícula 29

2.1.2 Diámetro de la partícula 30

2.1.3 Densidad de la partícula 30

2.1.4 Porosidad mínima de fluidización 30

2.1.5 Parámetros del aire 31

2.1.6 Número de Reynolds 31

2.2 Caída de presión 32

2.3 Velocidad mínima de fluidización 33

2.3.1 Velocidad superficial del aire (u_0) 33

2.3.2 Velocidad mínima de fluidización (u_{mf}) 33

Capítulo 3 Selección de componentes de un secador de lecho fluidizado 39

3.1 Características del café 40
3.1.1 Esfericidad de la partícula 41
3.1.2 Diámetro de la partícula 41
3.1.3 Densidad de la partícula 44
3.2 Características del lecho 44
3.2.1 Porosidad mínima de fluidización 44
3.2.2 Número de Reynolds 45
3.2.3 Caída de presión 45
3.2.4 Velocidad mínima de fluidización (u_{mf}) 46
3.3 Cálculo del soplador centrífugo 46
3.4 Diseño de la cámara de secado o columna de fluidización 47
3.5 Diseño del distribuidor 50
3.6 Diseño del ciclón 52
3.7 Accesorios y equipos de control 54
3.8 Ensamble del secador 55
Capítulo 4 Pruebas experimentales y presupuesto 59
4.1 Pruebas experimentales 59
4.2 Presupuesto 63
Conclusiones 65
Referencias bibliográficas 67
Planos 69
Plano 1 Plano de la cámara de secado 71
Plano 2 Plano del distribuidor 74

Lista de tablas

Tabla 1 Criterios de clasificación de un secador 20

Tabla 2 Parámetros del aire 31

Tabla 3 Resumen de parámetros del café arábigo seco utilizado 45

Tabla 4 Características de ciclones convencionales 53

Tabla 5 Características del ciclón 53

Tabla 6 Resultados de ensayos en vacío 59

Tabla 7 Resultados de ensayos con carga de café 60

Tabla 8 Cálculos de porosidad en lecho fluidizado 62

Tabla 9 Comparaciones de la velocidad media en vacío y con carga de café 63

Tabla 10 Presupuesto 63

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Lista de figuras

Figura 1 Proceso básico de secado 18

Figura 2 Etapas del proceso de secado 19

Figura 3 Clasificación según la hidrodinámica del flujo del material 21

Figura 4 Clasificación de los secadores según su modo de operación 22

Figura 5 Secador de lecho fluidizado 23

Figura 6 Clasificación de los secadores de lecho fluidizado 23

Figura 7 Secador de lecho fluidizado por lotes 24

Figura 8 Modelo de un secador de lecho fluidizado continuo 25

Figura 9 Secador de lecho fluidizado semi - continuo 25

Figura 10 Secador de lecho fluidizado de flujo de enchufe 26

Figura 11 Tipos de lechos 27

Figura 12 Dimensiones axiales para determinar la esfericidad (a: longitud mayor, b: ancho o longitud menor y c: altura) 29

Figura 13 Variación de presión con respecto a la velocidad del fluido 34

Figura 14 Equipo gasificador 40

Figura 15 Googlemaps – Equipo investigador 40

Figura 16 Probeta y vaso de precipitado 42

Figura 17 Probeta con café y probeta con café y agua 42

Figura 18 Nivel de agua en la probeta 43

Figura 19 Peso del café 43

Figura 20 Esquema densidad aparente y densidad real 44

Figura 21 Imagen del blower utilizado 47

Figura 22 Plano y vista en 3D de la cámara de fluidización 48

Figura 23 Construcción cámara de acrílico 49

Figura 24 Cámara de fluidización en acero ASTM A36 de 10 mm de espesor con una ventana de visualización 50

Figura 25 Plano del distribuidor de aire 51

Figura 26 Imagen del distribuidor de aire 51

Figura 27 Material empaquetadura y malla metálica 52

Figura 28 a. Flujos en un ciclón y b. Cotas de ciclón 52

Figura 29 Imagen del ciclón existente 54

Figura 30 Transmisor FTS34-4011-0MD 54

Figura 31 Variador de frecuencia ATV12HU15M2 55

Figura 32 Laptop DELL XPS 55

Figura 33 Prototipo de secador de lecho fluidizado 56

Figura 34 Detalle sistema de admisión de aire 56

Figura 35 Detalle de medición del sensor de aire 57

Figura 36 Lecho estático con 1.5kg de café 61

Figura 37 Fluidización de 1kg de café 61

Figura 38 Fluidización de 1.5kg de café 62

Introducción

El café es uno de los principales productos agrícolas de exportación del Perú. Que ocupa el noveno lugar de la producción mundial y séptimo como exportador en los últimos años. Se produce café arábico en los valles interandinos y de la cordillera oriental de los Andes, en su encuentro con la selva peruana preferentemente en alturas superiores a 800 m.s.n.m. Como en otros países de la región, la producción está concentrada en pequeños productores que en promedio poseen entre dos y tres hectáreas. Aproximadamente un 80% de cafetaleros peruanos, conducen sus chacras de manera tradicional y sin gestión empresarial (sin manejo de costos). No se tiene la infraestructura física necesaria para las labores de postcosecha (casi todo se realiza de manera artesanal). Las labores de beneficio coinciden con las épocas de lluvias, especialmente en las zonas altas, lo que no permite un buen secado del producto; además, en tales estaciones las vías de comunicación se encuentran intransitables, lo cual eleva los costos y deteriora la calidad.

El grano una vez que alcanza su madurez se debe cosechar y beneficiar inmediatamente. Una de las operaciones más importantes es el secado, que consiste en eliminar parte del agua del grano, desde 55% b.h de contenido de humedad inicial, hasta un 10 a 12% b.h de contenido de humedad final (Lopez Fontal, 2017)

El secado es definido como un proceso de separación de sustancias volátiles, como la humedad, que se encuentran adheridas internamente al producto, a través de la transferencia de energía desde la fuente secadora al producto y la transferencia de masa en forma de humedad al exterior mediante su difusión, a través de orificios o espacios huecos del objeto que se conectan con el exterior llamados poros.

Existen varios procesos para secar el café, puede ser de forma natural (solar) o mecánica, la diferencia radicará en mantener el valor nutritivo, calidad del café y costos de producción.

Dentro de las nuevas tecnologías tenemos el secado en lecho fluidizado, el cual es un método muy eficaz de secado de partículas sólidas. La fluidización es una operación unitaria que posee características intermedias entre el desplazamiento de sólidos en el seno de un fluido, y el flujo de fluidos a través de partículas sólidas. Cuando un fluido atraviesa, de abajo hacia arriba, un lecho de granos cuyo tamaño varía entre límites estrechos, se establece el gradiente de presión necesario para vencer el frotamiento. Si se aumenta la velocidad del flujo

se provocará un aumento en el gradiente de presión. Cuando la pérdida de presión se acerque al valor del peso del lecho por unidad de superficie de sección transversal al flujo, los granos comienzan a moverse. En este punto comienza la fluidización (Lopez Fontal, 2017)

Por lo mencionado justificamos nuestro trabajo de investigación titulado “Diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado” como un aporte a la comunidad científica y empresarial cafetalera, basado en un fin y aspiración primordial de la Universidad de Piura. “Proporcionar formación integral y preparación profesional a sus alumnos, para que puedan servir a sus conciudadanos y promover el bien común por medio de la propia profesión y actuación cívica, con competencia, honestidad y espíritu solidario.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Antecedentes

En los últimos años la exportación de café en el Perú ha descendido notablemente debido al incremento de la producción en otros países lo que ha ocasionado la disminución del precio de venta. Grandes exportadores como Brasil, el principal exportador mundial, seguido de Vietnam, Colombia, Indonesia, Etiopia, India, Uganda y México superan a Perú en volúmenes de exportación. Uno de los principales factores que influyen en el precio de exportación de café es el rendimiento del área cultivada sin disminuir la calidad del café, el cual en Perú se ha ido reduciendo debido a la falta de fertilizantes adecuados, incremento de los costos de mantenimiento, tecnologías de secado adecuadas, falta de vías de trasporte adecuadas, entre otras (Choque, 2021).

Una de las mejores formas para preservar la calidad del café, neutralizando la acción microbiana y evitando su degradación sin perder su valor nutritivo del café es el secado de los granos por fluidización con aire. Es por ello por lo que el presente trabajo de investigación resume el diseño básico para implementar un prototipo de secador por lecho fluidizado de laboratorio, que sirva para los productores de la región.

Diversos métodos de secado por fluidización con aire se han ido mejorando para procesos de la industria desde 1948, gracias a que el avance en la tecnología hizo posible la implementación de sensores o instrumentación y de la electrónica necesaria para la automatización de los procesos haciéndolos más controlables y permitiendo así un mejor funcionamiento y utilización del proceso de secado. (Gonzales Sánchez, 2009).

El secado por fluidización es una técnica para eliminar humedad de los granos de café mediante el paso de un aire caliente a través de un lecho donde descansan los granos de café. La velocidad del aire caliente debe ser tal que los granos de café “floten” en él. Este proceso turbulento tiene una serie de ventajas para la calidad del producto ya que los flujos de calor elevado y de masa, junto a una menor dispersión de temperatura y humedad, garantizan la homogeneidad del café seco. Es por ello, la importancia de este tipo de procesos de secado para la producción de café en el país. (Gonzales Susatama, 2014)

1.2 Secado

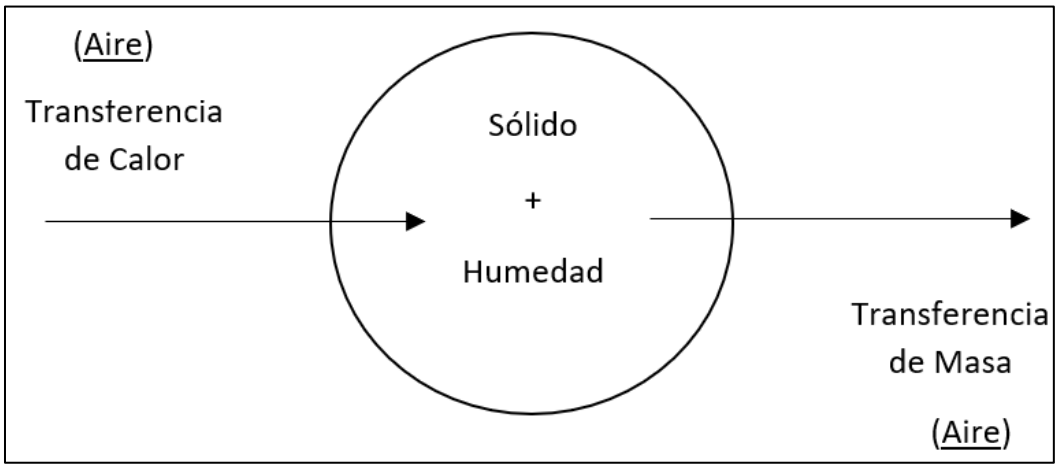
Como se indicó en el apartado anterior, el proceso de secado es una de las técnicas más antiguas utilizadas para la conservación de los alimentos, en donde su operación radica básicamente en el intercambio simultaneo de calor y de masa, sólido – entorno. (Mendieta Bojorge & Picado Rivera, 2002)

1.2.1 Proceso de secado[1]

En la actualidad la operación de secado (ver Figura 1) es de vital importancia para los procesos productivos por lo económico y práctico. En términos generales es un proceso unitario que consiste en quitar la humedad de un sólido hasta niveles óptimos para almacenaje y alargamiento de su vida útil. El grado de humedad está supeditado al producto final que deseemos. Dicha operación de secado ocurre mediante una transferencia de calor y de masa en forma simultánea: aire – sólido – aire.

Figura 1

Proceso básico de secado



Nota. Unigarro Bolaños (2007)

En donde:

La transferencia de calor se verifica cuando el aire entrega calor al sólido y se da en 02 etapas:

- Transferencia de calor desde el aire a la superficie del sólido, pudiendo ocurrir por conducción, convección o radiación.
- Transferencia de calor desde la superficie del sólido hasta el interior del mismo pudiendo ocurrir solo por conducción.

[1] Este apartado ha sido elaborado utilizando las referencias (Unigarro Bolaños, 2007) y (Maupoey, Andrés Grau, Barat Baviera, & Albors Sorolla, 2020)

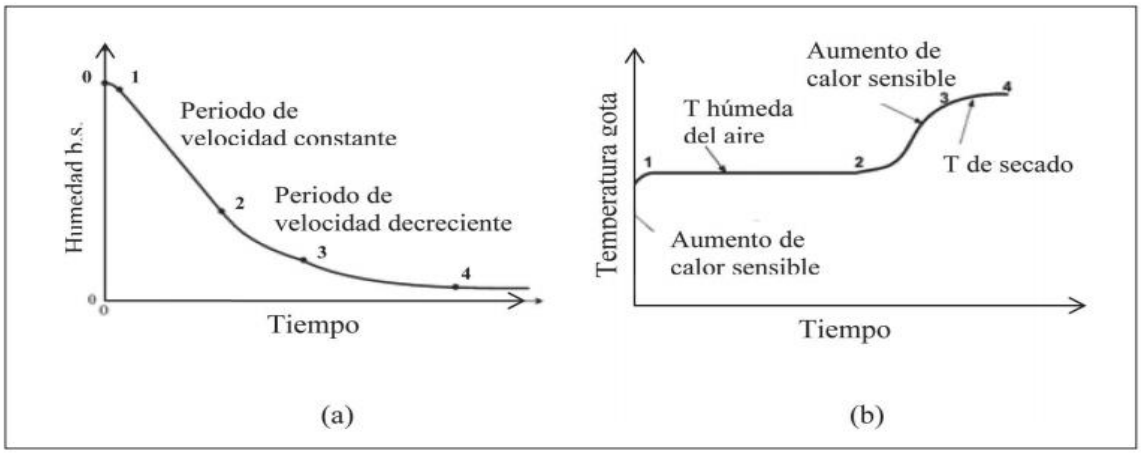
Cuando la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio; y el proceso de secado ha cesado.

Siendo muchas las soluciones de secado para un proceso industrial. Todas ellas radican básicamente siempre en las necesidades, en el tiempo de procesamiento y en la calidad final del producto que se desee. Razón a ello lo hemos divido en tres fases (ver Figura 2):

- Fase inicial de precalentamiento (tramo 0 -1)
- Velocidad de secado constante (tramo 1-2)
- Una o más fases de velocidad de secado decreciente (tramo 2-4)

Figura 2

Etapas del proceso de secado



Nota. Unigarro Bolaños (2007)

A continuación, se pasa a detallar cada uno de los tramos de la Figura 2.

<u>Precalentamiento (Tramo 0-1):</u>

Aquí el sólido experimenta un aumento de calor sensible hasta la temperatura húmeda correspondiente a la temperatura del aire de secado.

<u>Velocidad constante de secado (Tramo 1-2):</u>

En esta fase, la humedad existente en el interior del sólido se desplaza rápidamente hacia la superficie de este saturándola completamente para luego evaporarse al aire. Produciéndose de esta manera la contracción del sólido. En esta fase, la velocidad de secado es constante y es el máximo valor alcanzado en todo el proceso. Y si las condiciones de su entorno no varían, la temperatura del sólido permanece igual que la temperatura húmeda del aire en todo este intervalo de tiempo que conlleva esta fase, hasta alcanzar la humedad crítica.

Velocidad decreciente de secado (Tramo 2-4):

En esta etapa el sólido tiene en su superficie un conglomerado de partículas y líquido en forma de costra seca, la misma que deja de estar saturada de humedad, llegando a tener un determinado diámetro final del sólido que se deja de contraer; esto, producto de las anteriores fases del proceso. La costra formada produce una resistencia adicional a la evaporación de humedad remanente. Y a medida que transcurre el proceso secado el espesor aumenta, disminuye la velocidad de secado y la temperatura del sólido aumentará progresivamente hasta alcanzar la temperatura de secado – dejando de ser igual a la temperatura húmeda del aire.

En todo proceso, el mismo finaliza cuando se obtiene la humedad del sólido deseada y si este conllevara de mucho tiempo cesará hasta obtener la mínima humedad posible que es igual al contenido de humedad de equilibrio con el aire seco.

1.2.2 Tipos de proceso de secado[2]

Debido a que el proceso de secado es de suma importancia para la industria; por la adecuación de la materia prima – producto final de acuerdo con la necesidad. Existen diversas técnicas para tal fin, bajo condiciones del entorno controladas. De ahí la necesidad de clasificarlas según muchos criterios que mostramos a continuación:

a. Clasificación según distintos criterios (ver Tabla 1):

Tabla 1

Criterios de clasificación de un secador

Criterios de clasificación de un secador	Ejemplo de tipos de secador
Presión en el secador	Secadores atmosféricos y vacuométricos.
Método de operación	Secadores continuos y discontinuos.
Método de aplicación de calor	Secadores convectivos, contacto, infrarojos, dieléctricos.
Tipo de medio secante	Aire caliente, vapor sobrecalentado, gases de combustión.
Dirección del flujo de calor y material	Flujo contracorriente, paralelo o cruzado.
Modo de secado del flujo medio	Flujo libre o forzado.
Método de extracción de humedad	Con el flujo del medio secante, con gas inerte, por absorción química.
Forma del material húmedo	Líquidos, granulares, pastosos.
Tipo del flujo de material (condiciones hidrodinámicas)	Con material estacionario, en movimiento, material disperso.
Escala de operación	Desde 10 kg/hr a 100 ton/hr.

[2] Este apartado ha sido elaborado utilizando la referencia (Urrutia Sánchez, 2006)

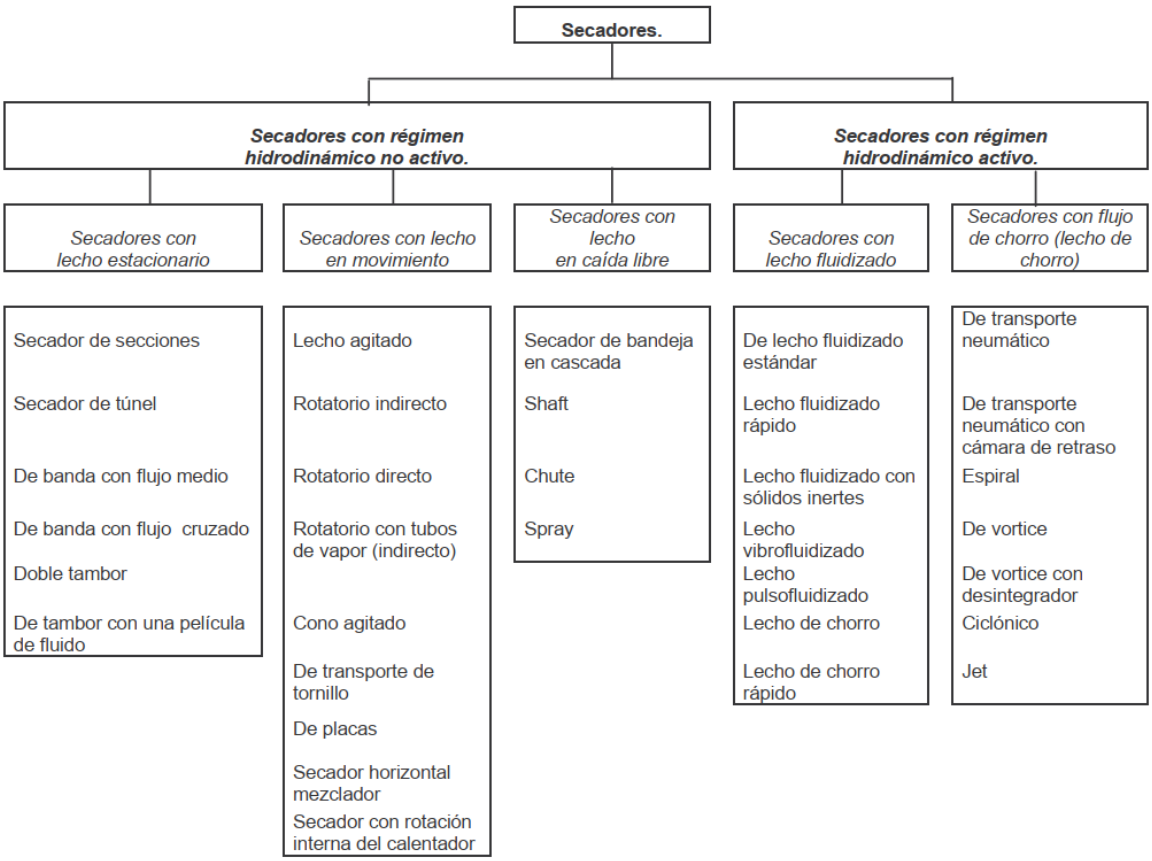
Construcción del secador	De bandeja, túnel, rotatorio, lecho fluido, etc.

Nota. Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para Biomasa Forestal (2006)

b. Clasificación según la hidrodinámica del flujo de material (ver Figura 3):

Figura 3

Clasificación según la hidrodinámica del flujo del material

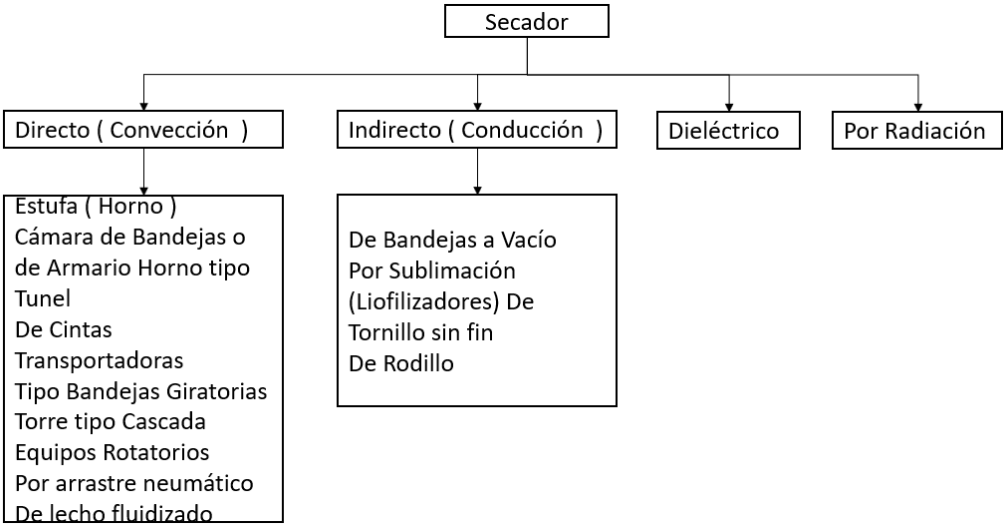


Nota. Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para Biomasa Forestal (2006)

c. Clasificación basada sobre el método de operación, tal como se muestra en la figura 4:

Figura 4

Clasificación de los secadores según su modo de operación



Nota. Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para Biomasa Forestal (2006)

Para el presente trabajo nos concentraremos en la clasificación según el modo de operación, básicamente en los secadores directos que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar calor y extraer el líquido por evaporización "Secadores de lecho fluidizado".

1.3 Secadores de lecho fluidizado[3]

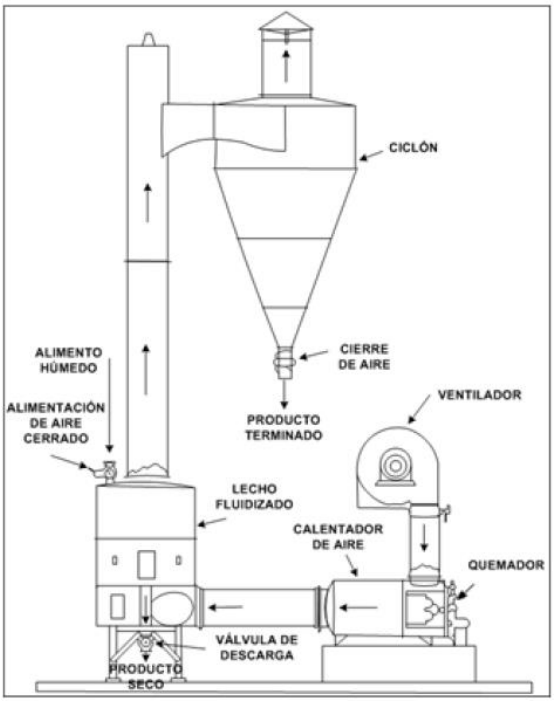
Es un secador (ver Figura 5), que puede trabajar en forma continua o intermitente, cuyo agente secante y de fluidización es el aire caliente a temperaturas de 150 °C o superiores dependiendo del producto. Se utilizan por lo general para productos granulares y homogéneos; pues, gracias a este proceso de secado, el sólido fluidizado consigue una gran superficie de contacto con el aire, logrando de esta manera elevadas velocidades de transferencia de materia sólido-aire y por ende tiempos de secado muy cortos, consiguiendo una uniformidad de secado perfecta del sólido.

Estos secadores por lo general tienen una cámara cilíndrica en cuya base hay una rejilla que sirve para distribuir uniformemente los gases calientes a lo largo y ancho del lecho.

[3] Este apartado ha sido realizado utilizando las referencias (Unigarro Bolaños, 2007) y (Mondragón, Julia, Barba, & Jarque, 2013)

Figura 5

Secador de lecho fluidizado



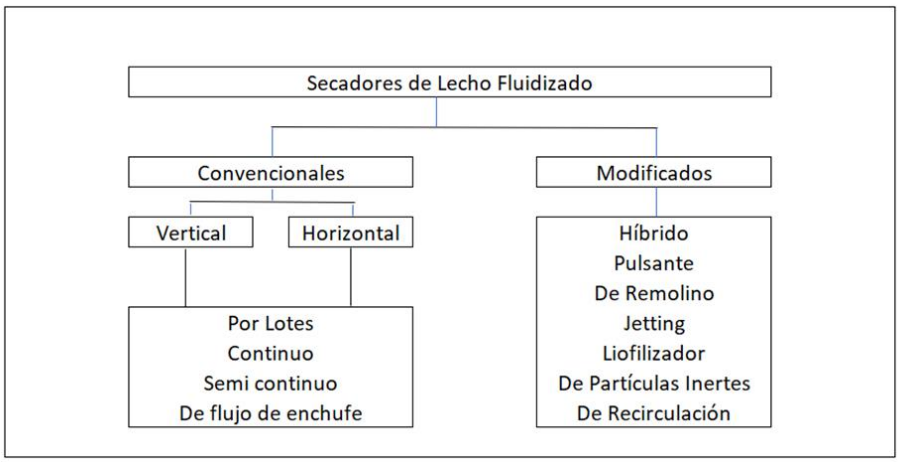
Nota. Unigarro Bolaños (2007)

1.3.1 Tipos de secadores de lecho fluidizado

Los secadores de lecho fluidizados se pueden clasificar como convencionales y modificados, tal como se muestra en la Figura 6:

Figura 6

Clasificación de los secadores de lecho fluidizado



Nota. Unigarro Bolaños (2007)

Objeto del presente trabajo hacemos referencia a los secadores de lecho fluidizado del tipo convencionales:

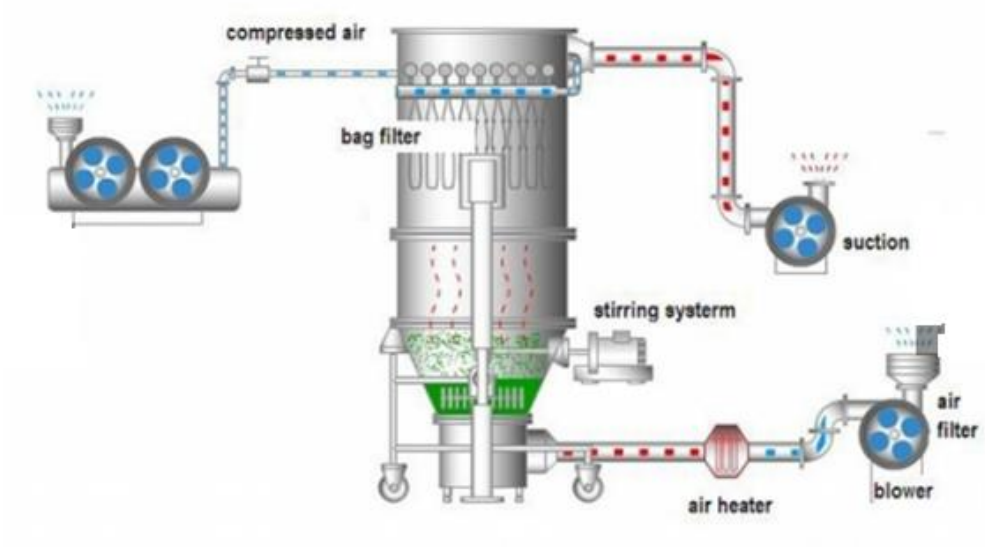
1.3.1.1 Secador de lecho fluidizado por lotes. Tal como se muestra en la Figura 7, es utilizado para secar todo tipo de material crudos en polvo o bloque, granulares grandes y hasta materiales con propiedades adhesivas. Son perfectos para aquellos materiales que experimentan cambios de volumen durante el secado.

Son de múltiples aplicaciones químicas, farmacéuticas y alimenticias. La cámara es una estructura redonda carente de ángulos muertos donde pudiera estancarse el material, utilizan un dispositivo helicoidal para extrusar y vibrar el material granular por medio del mezclado de alta velocidad creando así flujos de aire durante la operación. Previniendo de esta manera la formación de bultos de materiales húmedos.

Dentro de la cámara de secado se crea la fluidización por medio de un proceso de revuelto, creando una presión negativa. La humedad se evapora y se remueve rápidamente con el sistema de escape.

Figura 7

Secador de lecho fluidizado por lotes

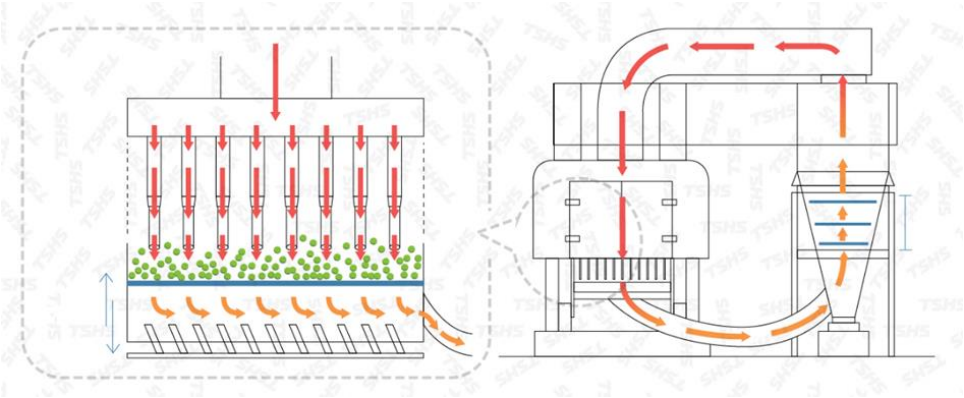


Nota. Etw cloud (2022)

1.3.1.2 Secadores de lecho fluidizado bien mezclado y continuo. Su principio de funcionamiento es con aire caliente que flota en la cámara para lograr un efecto uniforme de secado y tostado. El aire caliente pasa a través del sistema de calefacción → sistema de transporte → sistema de filtrado y luego regresa al sistema de calefacción, es un sistema de circulación de aire caliente; mediante el reciclaje y el recalentamiento del aire caliente, la temperatura se controla, se logra un ahorro de energía y la tasa de intercambio de calor aumenta. De procesamiento rápido, bueno para la producción en masa, alcanza temperaturas de 300°C, disponible para una variedad de productos. Tal como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Modelo de un secador de lecho fluidizado continuo



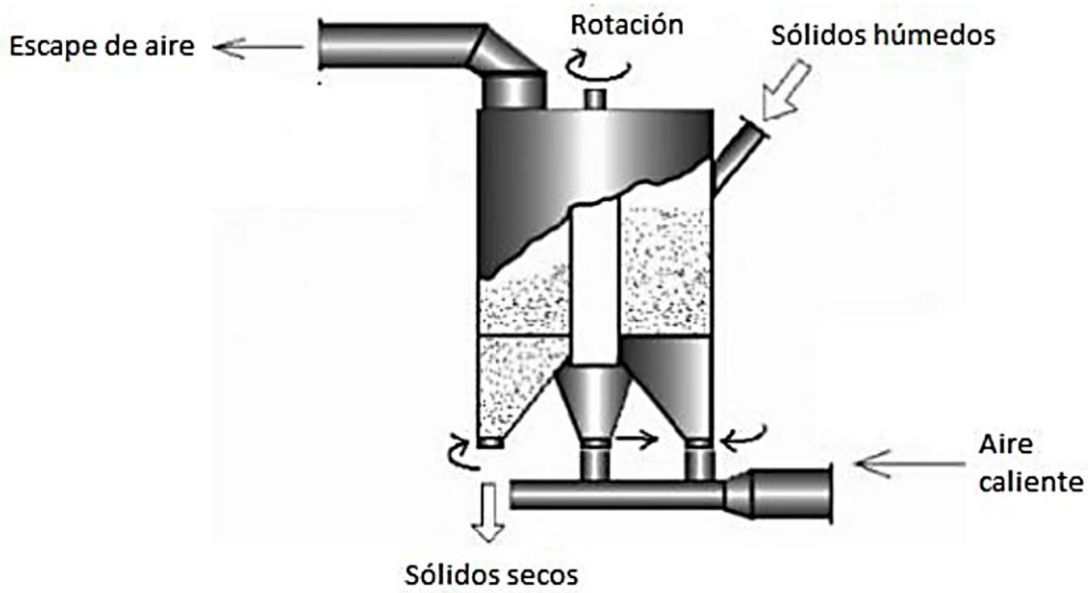
Nota. Tsung Hsing (2022)

1.3.1.3 Secadores de lecho fluidizado semi – continuos. En el sistema de secado semi - continuo de lecho fluidizado, la cámara de secado consiste en una serie de subprocesadores. El producto húmedo se dosifica y carga con precisión en los lotes. El producto es transportado por lotes de un procesador a otro procesador o los lotes (los procesadores con los lotes de producto) giran a lo largo de la línea de proceso. Esto proporciona un funcionamiento continuo ininterrumpido durante un largo período. La figura muestra un diagrama esquemático de una FBD (Fluidized bed dryer) semi-continua en la que se hacen girar los lotes.

Además, la temperatura y velocidad del gas en diferentes lotes pueden ser variadas (Mondragón, Julia, Barba, & Jarque, 2013), según se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Secador de lecho fluidizado semi - continuo

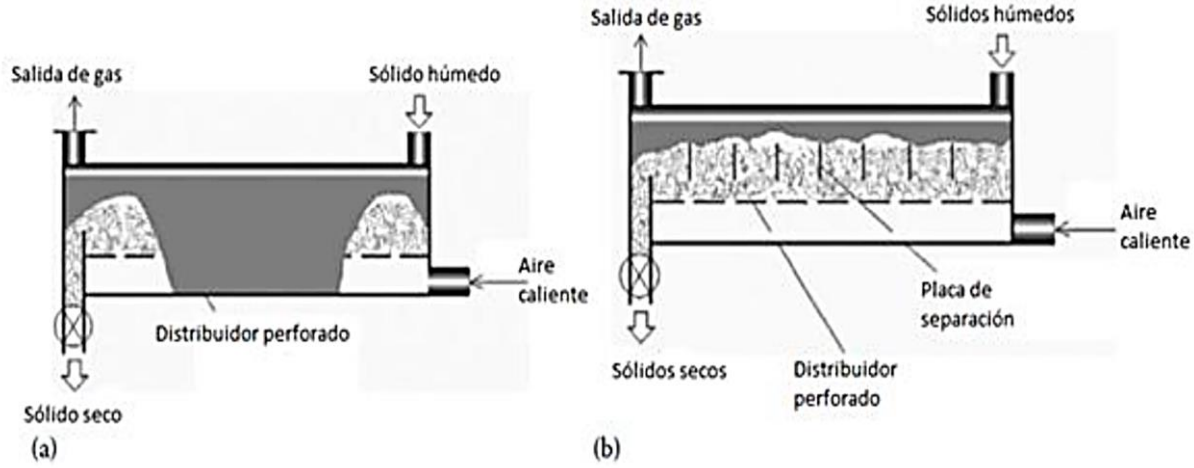


Nota. Unigarro Bolaños (2007)

1.3.1.4 Secadores de lecho fluidizado de flujo de enchufe. En FBDs de flujo de enchufe, se insertan deflectores verticales para crear una trayectoria de flujo de partícula estrecha, dando así una distribución de tiempo de residencia de partícula relativamente estrecha. Las partículas fluyen continuamente como un tapón desde la entrada hacia la salida a través de la trayectoria. Esto asegura un tiempo de residencia prácticamente igual para todas las partículas independientemente de su tamaño y asegura un contenido uniforme de humedad del producto. Se pueden diseñar varios caminos, como trayectorias espirales (Mondragón, Julia, Barba, & Jarque, 2013). Tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Secador de lecho fluidizado de flujo de enchufe



Nota. Unigarro Bolaños (2007)

1.4 Fenómeno de fluidización

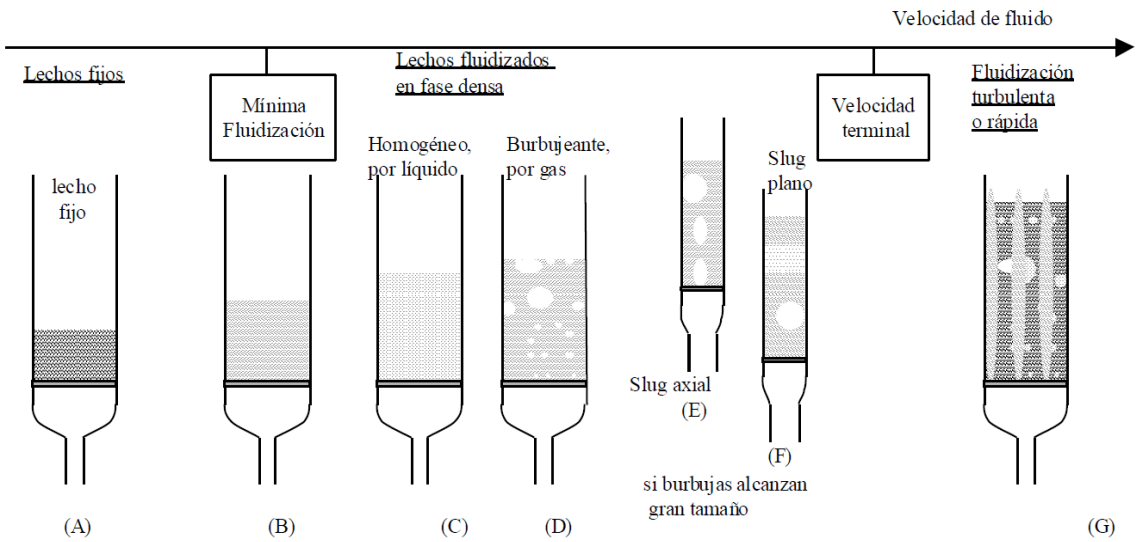
Cuando el aire caliente atraviesa, de abajo hacia arriba, una cama de granos de café cuyo tamaño es casi homogéneo, se forma un gradiente de presión necesario para vencer el rozamiento. Al aumentar la velocidad del flujo de aire caliente provocará un aumento del gradiente de presión. Cuando la pérdida de presión se acerque al valor del peso de la cama de café por unidad de superficie de sección transversal al flujo, los granos comienzan a moverse. En este punto comienza la fluidización (Lopez Fontal , 2017). Al conjunto de granos “flotando” se le denomina lecho fluidizado (Jácome Ramirez, 2015).

Dicho de otra manera, si el aire caliente ascendente a baja velocidad atraviesa una cama de granos de café, en principio el fluido se filtra a través de los espacios entre estas, que permanecen estacionarias; este estado se denomina de lecho fijo. Con un incremento en la velocidad del aire caliente, los granos de café vibran de forma independiente. Si se sigue aumentando la velocidad, se alcanza un punto donde todas las partículas o granos de café “flotan” o se encuentran suspendidas por el flujo ascendente de aire caliente. En este punto la fuerza de rozamiento entre el aire caliente y los granos de café se equilibra con el peso de

estas, desapareciendo entonces la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes. Este estado se denomina de lecho en comienzo de fluidización y marca la transición entre el lecho fijo y el lecho plenamente fluidizado. La velocidad superficial del fluido en este punto se denomina velocidad de mínima fluidización. (Jácome Ramirez, 2015)

Figura 11

Tipos de lechos



Nota. Martín, Salcedo, & Font (2011)

1.5 Ventajas y desventajas de la fluidización

Después de conocer el proceso de fluidización, los regímenes laminares y turbulentos de este tipo de secador podemos apreciar las siguientes ventajas y desventajas de este tipo de secador.

Ventajas:

- Permite preservar la calidad del café sin perder sus propiedades características.
- La transferencia de calor es directa e inmediata comparada con otros secadores.
- La rápida mezcla entre el fluido y los sólidos disminuye los tiempos de secado considerablemente.
- La rápida mezcla del fluido ascendente con los sólidos del lecho a lo largo del reactor hace que el proceso sea controlable.
- El sencillo proceso permite ser controlado con la instrumentación y automatización adecuada optimizándolo o adaptándolo a diferentes condiciones.
- Es adaptable a operaciones de diferentes tamaños.

Desventajas:

- Las condiciones de homogeneidad de los sólidos deben ser preclasificada previamente si no se quiere que exista alta aglomeración de sólidos.

- Si bien el proceso es sencillo, el elevado arrastre de partículas finas hace necesario instalar equipos captadores de polvo u otros pequeños desperdicios incrementando el costo de inversión y operación.

- Debido al proceso turbulento, existe gran cantidad de rozamiento o erosiones internas de los equipos lo que incrementa el costo de mantenimiento.

Capítulo 2

Parámetros de diseño de un secador de lecho fluidizado

2.1 Propiedades del producto a ser secado

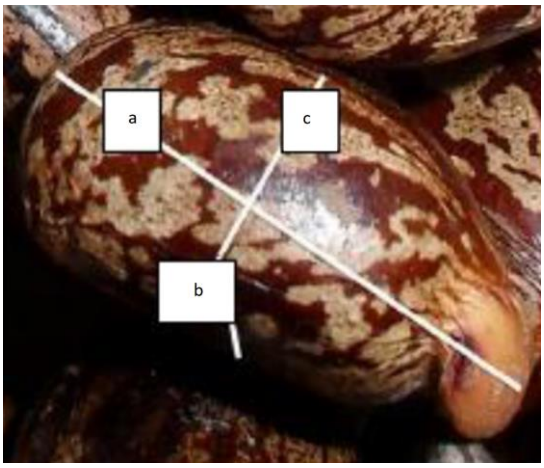
Es importante conocer las propiedades físicas de los granos de café ya que estos influyen directamente en el diseño del secador. Describiremos los parámetros físicos que intervienen en el cálculo de la velocidad de fluidización tales como el diámetro y esfericidad de la partícula, la porosidad mínima de fluidización, entre otros.

2.1.1 Esfericidad de la partícula

La esfericidad de la partícula o factor de forma; es una característica relacionada a partículas esféricas irregulares. Se determina con el método de Mohsenin (Mohsenin, 1970). Ver Figura ADB:

Figura 12

Dimensiones axiales para determinar la esfericidad (a: longitud mayor, b: ancho o longitud menor y c: altura)



Nota. Unigarro Bolaños (2007)

Se utiliza la siguiente ecuación: $\phi = \frac{\sqrt[3]{a.b.c}}{a}$ 1

Donde: ϕ es la esfericidad; “a”, “b” y “c” son el largo, ancho y alto de un grano de café. “a” es la cota de mayor dimensión.

2.1.2 Diámetro de la partícula

Para determinar el diámetro equivalente de granos de café generalmente se emplea el método de Arquímedes o de desplazamiento de agua.

Se mide el volumen de agua desplazada por un grano de café según Kunii y Levenspiel, (1969), para el diámetro equivalente para una partícula tenemos:

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6v_d}{\pi}} \qquad 2$$

Donde:

v_d es el volumen de agua desplazada por un grano de café [m^3]

2.1.3 Densidad de la partícula

Es la relación entra la masa y el volumen del grano de café. Se distinguen dos tipos de densidad, la del grano individual o real y la aparente que incluye los espacios intersticiales entre granos.

Para el cálculo de la densidad real, el volumen se obtiene aplicando nuevamente el principio de Arquímedes:

$$\rho_p = \frac{m}{v_2 - v_1} \qquad 3$$

Donde:

ρ_p es la densidad de la partícula [kg/m^3]

m es la masa de la partícula [kg]

v_2 es el volumen ocupado con la partícula [m^3]

v_1 es el volumen inicial [m^3]

2.1.4 Porosidad mínima de fluidización[4]

Para velocidades bajas del fluido sobre el lecho, la fuerza de presión no es suficiente para variar la estructura del lecho, por tanto, su porosidad no varía.

La porosidad del lecho depende de la relación existente entre el diámetro de la partícula, el diámetro del lecho, la rugosidad de las paredes de la columna, la presión y la

[4] Este apartado ha sido realizado a partir de la referencia (Jácome Ramirez, 2015)

temperatura de operación. Para medir el porcentaje de poros en el lecho, se utiliza la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{volumen\ del\ lecho - volumen\ de\ las\ partículas}{volumen\ del\ lecho}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{Lecho}}{\rho_{sólido}} \qquad 4$$

Sin embargo, a medida que la velocidad aumenta linealmente el lecho inicia un proceso de expansión aumentando el volumen de huecos, en este momento se establece la porosidad mínima de fluidización, para calcularla se puede utilizar la siguiente formula:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_s} \qquad 5$$

Donde:

ε_{mf} es la porosidad mínima de fluidización

ρ_L Densidad del lecho estático [kg/m^3]

2.1.5 Parámetros del aire

Los parámetros como presión, temperatura, viscosidad y densidad del aire como fluido secador; influyen directamente en el tiempo y calidad del secado de café.

Se han considerado los siguientes parámetros del aire:

Tabla 2

Parámetros del aire

Presión (P)	1	Atm
Viscosidad (μ)	1.85 x 10^{-5}	Pa.s
Densidad (ρ)	1.18	kg/m^3

Nota. Jaramillo Calle & Narváez Quiranza (2012)

2.1.6 Número de Reynolds

Es un número adimensional que determina la relación entre masa y velocidad del movimiento de las partículas en un fluido. Este relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande) (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012)

$$N_{re} = \sqrt[2]{\left[33.7^2 + 0.0408 * \frac{{d_p}^3 * \rho_2 * (\rho_2 - \rho_1) * g}{\mu^2}\right]} - 33.7 \qquad 6$$

Donde:

N_{re} es el número de Reynolds

d_p es el diámetro equivalente de la partícula (m)

ρ_2 es la densidad de la partícula (kg/m^3)

ρ_1 es la densidad del fluido (kg/m^3)

μ es la viscosidad del fluido (Pa.s^2)

g es la gravedad (9.8 m/s^2)

2.2 Caída de presión[5]

Gonzáles (2009):

Un lecho de partículas comienza a fluidizar cuando la fuerza de arrastre debida al flujo es igual al peso de estas:

$$\begin{bmatrix} Pérdida\ de \\ presión\ del \\ lecho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sección \\ del \\ lecho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Volumen \\ del \\ lecho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fracción \\ de\ partículas \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Peso\ específico \\ aparente\ del \\ sólido \end{bmatrix} \qquad 7$$

o sea,

$$\Delta P\ S = W = S.L_{mf}.(1 - \varepsilon_{mf}).(\rho_s - \rho_g).g \qquad 8$$

Reagrupando términos, se obtiene que:

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}).(\rho_s - \rho_g).g \qquad 9$$

Donde:

ε_{mf} es la porosidad para la fluidización incipiente o de mínima fluidización.

ρ_s= Densidad del sólido [kg/m^3]

ρ_g= Densidad del gas [kg/m^3]

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

L_{mf} = Altura de mínima fluidización [m]

[5] Este apartado ha sido realizado a partir de la referencia (Gonzales Sánchez, 2009)

2.3 Velocidad mínima de fluidización[6]

2.3.1 Velocidad superficial del aire (u_0)

Se puede entender como velocidad superficial del aire (u_o), como la velocidad en función del área transversal del lecho, de acuerdo con la ecuación 9, se determina cuando en la columna no existen partículas y solo fluye el gas (aire). Se obtiene con la siguiente formula:

$$u_o = \frac{m}{\rho_g \varepsilon_m A_t} \qquad 10$$

Donde:

u_o = Velocidad superficial del aire [m/s]

ε_m = Porosidad del lecho $= \frac{Volumen_{lecho} - Volumen_{particulas}}{Volumen_{lecho}}$

ρ_g = Densidad del gas [kg/m^3]

m = Masa [kg]

A_t = Área transversal de la columna [m^2]

Al no conocer la fracción vacía, se puede recurrir a la siguiente ecuación:

$$u_o = \frac{V}{A_t} \qquad 11$$

Donde:

u_o = Velocidad superficial del aire [m/s]

V = flujo volumétrico del gas [m^3/s]

A_t = Área transversal de la columna [m^2]

2.3.2 Velocidad mínima de fluidización (u_{mf})

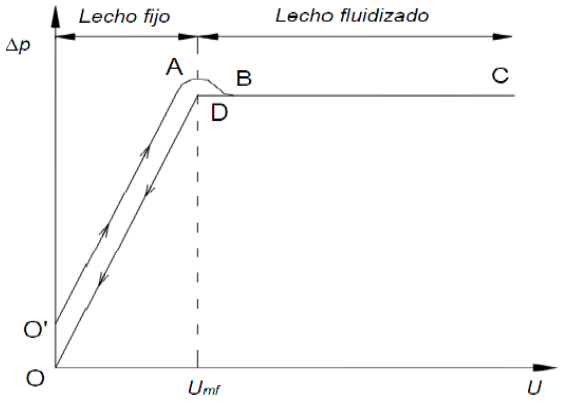
La velocidad mínima de fluidización es la velocidad del flujo de aire caliente necesario para mover los granos de café y dejarlos suspendidos durante el proceso de secado, es decir es el punto de equilibrio dinámico entra la fuerza del aire ejercida sobre las partículas y la gravedad.

Según la teoría de gases a través de medio porosos (Carman, 1956), la pérdida de carga a través del lecho cambia en función de la velocidad superficial como se muestra en la siguiente figura.

[6] Esta tesis ha sido elaborada a partir de la referencia (Jácome Ramirez, 2015))

Figura 13

Variación de presión con respecto a la velocidad del fluido



Nota. Gonzales Susatama (2014)

De la gráfica se observa en un primer tramo que la perdida de carga aumenta a medida que aumenta la velocidad del gas (tramo O'A/OD) hasta llegar a la velocidad mínima de fluidización, luego del cual la perdida de carga permanece constante a pesar del aumento de velocidad (tramo BC/DC). El primer tramo sería el lecho fijo, donde aún no se logra vencer el peso de la masa de café y el movimiento de los granos es nulo, y el segundo sería el lecho ya fluidizado y los granos de café logran mantenerse a flote.

La velocidad de mínima fluidización se puede determinar sobre la base de fórmulas teóricas, así como sobre la base de una serie de fórmulas empíricas.

Todas estas fórmulas fueron obtenidas bajo ciertas condiciones, por ejemplo, rango de tamaño de partícula, densidad del gas fluidizante, densidad de las partículas, rango de número de Reynolds y número de Arquímedes. También algunas correlaciones están destinados a la distribución del tamaño de partícula de baja dispersión y por lo tanto el valor real de la velocidad mínima de fluidización para la cama multidispersa con una distribución de partículas mucho más amplia puede diferir del valor calculado (Unigarro Bolaños, 2007).

Ergun realizó una deducción (Unigarro Bolaños, 2007):

$$\frac{(-\Delta p^{+})}{L} = 150\frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3}\frac{\mu u^{+}}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75\frac{(1-\varepsilon_m)}{\varepsilon_m^3}\frac{\rho(u^{+})^2}{\phi_s d_p} \qquad 12$$

Donde:

Δp^{+} = pérdida de presión manométrica, debida al rozamiento, [N/m^2]

L = altura del lecho [m]

ε_m = porosidad media del lecho o fracción volumétrica de huecos [equivalente a ε_m]

μ = viscosidad del fluido [kg/(m.s)]

u^+= velocidad superficial del líquido, calculada a sección total libre [m/s]

ϕ_s = factor de esfericidad

d_p = tamaño de partícula (m)

ρ = densidad del fluido (kg/m3)

A caudales de circulación bajos, el segundo término de la ecuación de Ergun es despreciable, y la pérdida de presión es directamente proporcional a la velocidad superficial, indicando que el régimen de circulación es laminar, y coincidiendo con la expresión anterior. Por el contrario, a caudales elevados, el segundo término es mayor, indicando que el régimen de circulación es turbulento.

Para encontrar la velocidad mínima de fluidización del gas, se utiliza una extrapolación de la ecuación de Ergun para lechos fijos combinada con la ecuación de caída de presión; que se mostró en ecuación 9. Ambas relacionan las variables que definen el lecho, y la combinación de estas cubre todos los factores que ayudan a encontrar la velocidad mínima de fluidización teórica. (Jacome, 2015)

De la combinación de las ecuaciones (9, 10 y 12):

$$(1-\varepsilon_{mf}).(\rho_s-\rho_g).g = 150\frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3}\frac{\mu u^+}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75\frac{(1-\varepsilon_m)}{\varepsilon_m^3}\frac{\rho(u^+)^2}{\phi_s d_p} \qquad 13$$

Realizando arreglos en la ecuación tenemos:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3\phi_s}\left(\frac{d_p u_{mf}\ .\rho_g}{\mu}\right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3\phi_s^2}\left(\frac{d_p u_{mf}\rho_g}{\mu}\right) = \frac{d_p^3\rho_g(\rho_s-\rho_g).g}{\mu^2} \qquad 14$$

Ó

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3\phi_s}{Re_{pmf}}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3\phi_s^2}Re_{pmf} = Ar \qquad 15$$

Donde la ecuación 15 ha sido tomada de (Jácome Ramirez, 2015) y cada uno de los términos son los siguientes:

ϕ= esfericidad de la partícula [-]

d_p= diámetro de la partícula [cm]

ε_{mf} = porosidad mínima de fluidización [-]

μ = viscosidad del gas [kg/m*s]

u_{mf}= velocidad mínima de fluidización [m/s]

ρ_s= densidad del solido [kg/m^3]

ρ_g = densidad del fluido [kg/m^3]

Ar = Número de Arquímedes que se obtiene a partir de:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g).g}{\mu^2} \qquad 16$$

A continuación, se obtendrán las diferentes ecuaciones que permitirán el cálculo de la velocidad mínima de fluidización, dependiendo del tipo de régimen de circulación del fluido (Gonzales Sánchez, 2009).

a. Régimen laminar

Cuando el régimen de circulación del fluido sea laminar, el segundo término del segundo miembro de la ecuación de Ergun es despreciable frente al primero, con lo que su expresión se simplifica.

$$\frac{(-\Delta p^+)}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu u}{(\phi_s d_p)^2} \qquad 17$$

Por lo que, al utilizar esta expresión en la ecuación, es posible determinar la velocidad mínima de fluidización en régimen laminar:

$$u_{mf} = \frac{1}{150} \frac{\varepsilon_{mf}^3}{(1-\varepsilon_{mf})} \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} \rho_g (\phi_s d_p)^2 \qquad 18$$

b. Régimen turbulento

Cuando el valor del número módulo de Reynolds de partícula es menor de 40 el régimen de circulación de considera laminar, mientras que para valores superiores a 40 se considera turbulento (Gonzales Sánchez, 2009).

Cuando el régimen de fluidización es turbulento en la ecuación de Ergun, el termino de velocidad el que despreciable frente al del cuadrado de la velocidad.

Por tanto, la caída de presión que experimenta el fluido se podrá expresar como:

$$\frac{(-\Delta p^+)}{L} = 1.75 \frac{(1-\varepsilon_m)}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho u^2}{\phi_s d_p} \qquad 19$$

Al sustituir esta expresión en la ecuación es posible determinar la velocidad mínima de fluidización en régimen turbulento.

$$u_{mf} = 0.756\left[\frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g\, \varepsilon_{mf}^3 \phi_s d_p\right]^{1/2} \qquad 20$$

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Capítulo 3

Selección de componentes de un secador de lecho fluidizado

Para el desarrollo del diseño del prototipo de deshidratador de café, objeto del presente trabajo de investigación, se ha revisado información teórica descrita en el capítulo 1 y capítulo 2; se utilizó la infraestructura disponible en la Universidad de Piura y así mismo se tomó como referencia física inicial de un equipo "Gasificador de lecho fluidizado burbujeante" utilizado y referido en los siguientes documentos:

a. Tesis: "Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante"

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico

Autor: Ricardo Ismael García Valladolid

Asesor: Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana.

Piura, marzo 2017

b. Tesis en desarrollo: "Acondicionamiento del sistema de gasificación de lecho fluidizado tipo burbujeante instalado en la Universidad de Piura"

Autor: Alonso Nicolas Chira Rodríguez

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico – Eléctrico

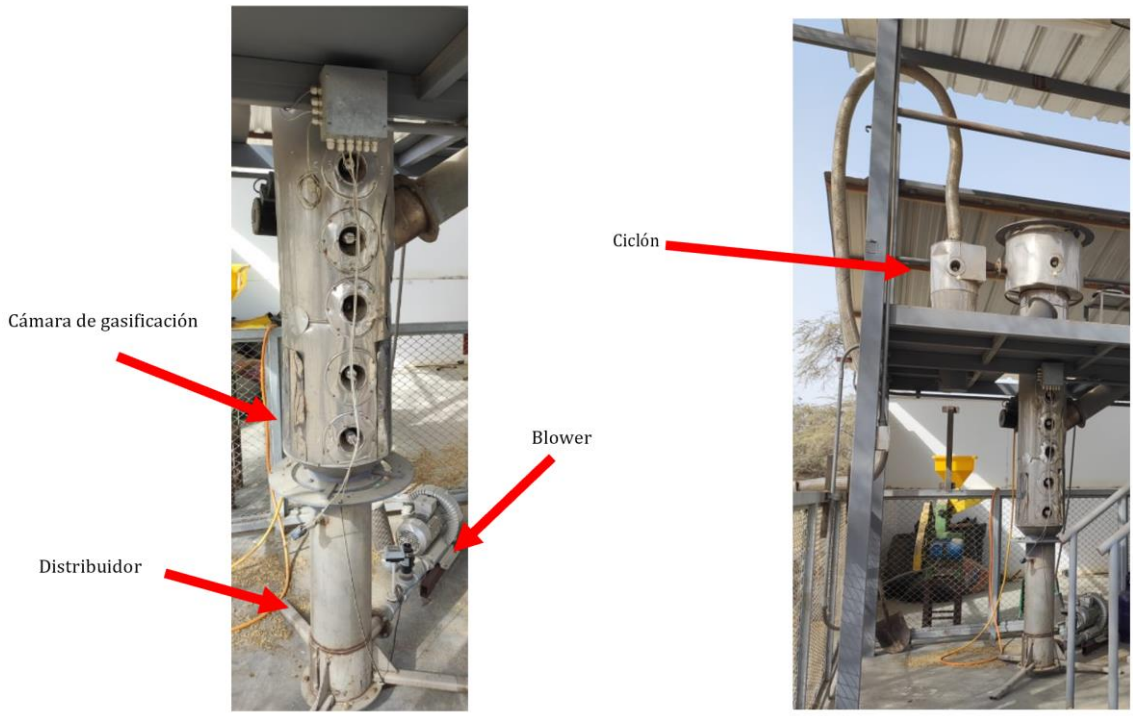
Piura, enero 2023

En nuestra primera visita de campo, estudiamos el equipo gasificador que referimos previamente. Ver Figura 14.

También se adjunta imagen de la ubicación del prototipo y del grupo de trabajo (ver Figura 15).

Figura 14

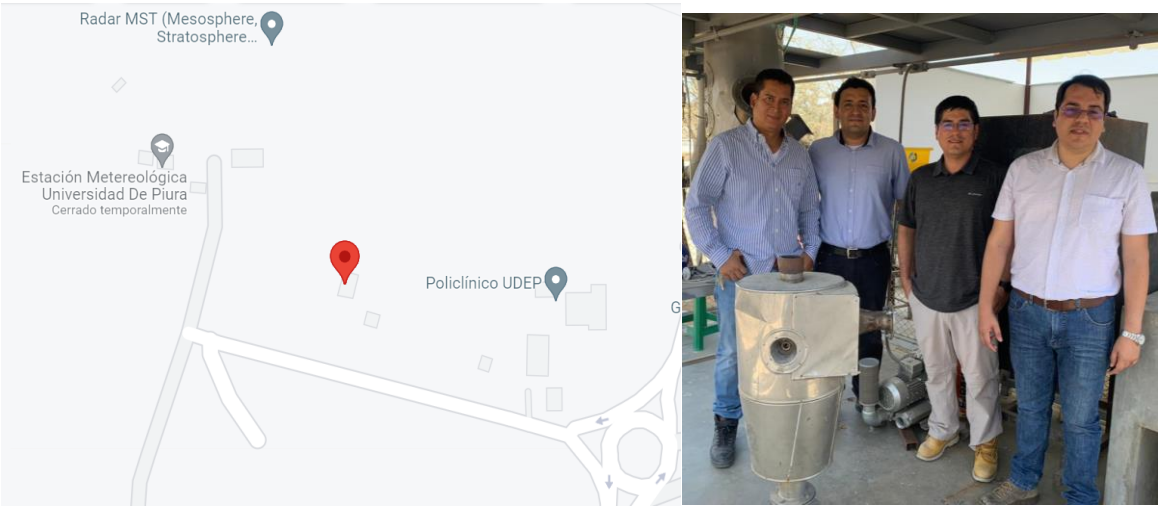
Equipo gasificador



Nota. Elaboración propia

Figura 15

Googlemaps – Equipo investigador



Nota. Google maps (s.f.)

3.1 Características del café

El equipo de investigación adquirió muestras de café arábigo procedente de las zonas de cultivo de Ayabaca, Piura. Con el objetivo de realizar una prueba experimental del proceso de fluidización. Dada la fecha del año en el mercado local, solo encontramos café arábigo seco.

3.1.1 Esfericidad de la partícula

Se utilizó referencia bibliográfica para el grano de café arábigo, para lo cual se determinó una esfericidad de:

$$\phi = 0.62$$

Este valor ha sido obtenido de (González Susatama , 2014).

3.1.2 Diámetro de la partícula

Utilizamos el laboratorio de física de la Universidad de Piura, utilizando el método de Arquímedes, se desarrolló:

- Colocamos 150 ml de agua en un vaso de precipitación (ver Figura 16a).
- Pesamos 94.2 gr. de granos de café (ver Figura 16b).
- Colocamos los granos de café en un vaso de precipitación y leemos el volumen aparente. Que en este caso fue de 230 ml. (ver Figura 17a).
- Al vaso de precipitación que contiene los granos de café le agregamos agua hasta la línea de 250ml. (ver Figura 17b).
- El saldo en el primer vaso de precipitación que contenía 150 ml de agua, luego del vaciado, fue de 36 ml. Es decir, ingresó agua al vaso que contenía solo café 150-36=114 ml. (ver Figura 18).
- Considerando el paso 4 y 5, se infiere que el volumen real de 94.2 gr. café es de 250-114= 136 ml.
- Tomamos una muestra de 1000 granos de café y los pesamos para lo cual se obtuvo 431(Total)-39(Envase)=392 gr., luego se calculó una masa promedio por grano de 0.392 gr./grano (ver Figura 19).
- Con el resultado del paso 7, para 94.2 gr. de café se obtiene 240.31 granos equivalente.

Figura 16

Probeta y vaso de precipitado

a.

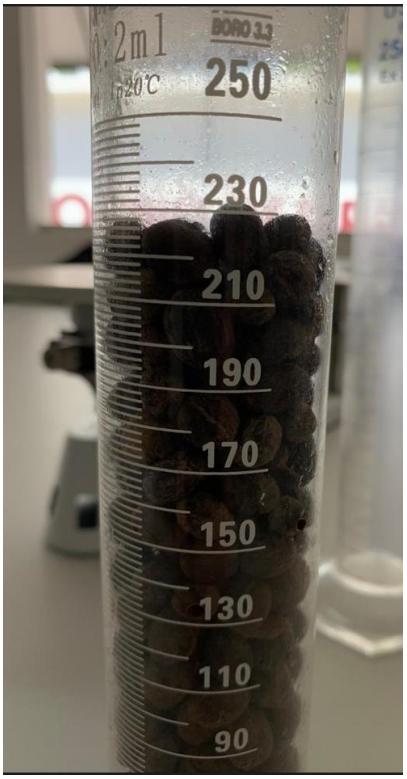
b.

Nota. Elaboración propia

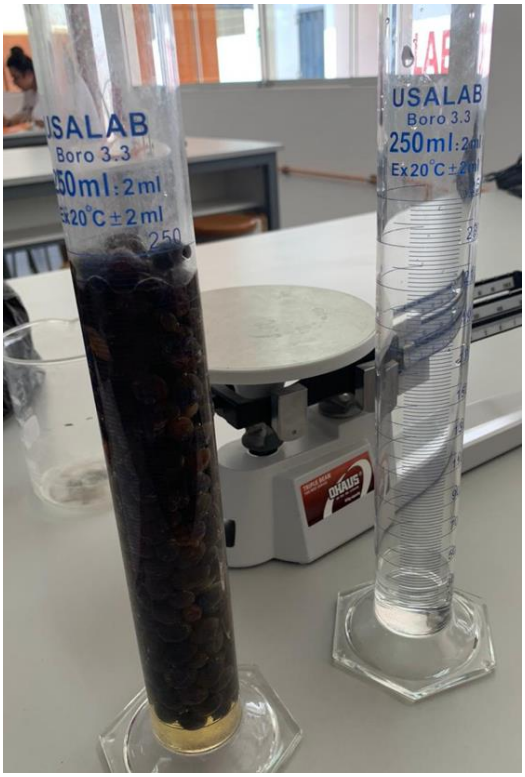
Figura 17

Probeta con café y probeta con café y agua

a.



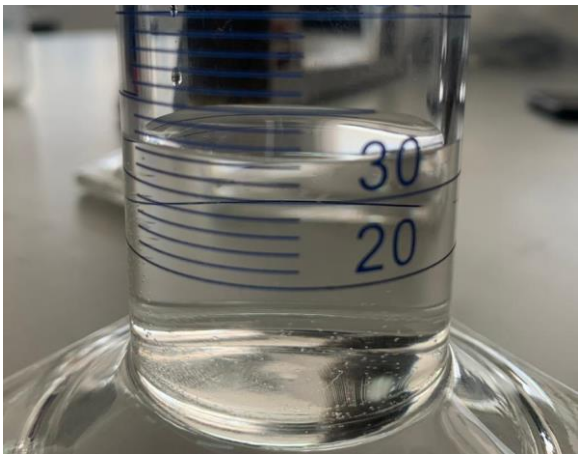
b.



Nota. Elaboración propia

Figura 18

Nivel de agua en la probeta



Nota. Elaboración propia

Figura 19

Peso del café

a.

b.

Nota. Elaboración propia

Para el calcular el diámetro equivalente, ecuación 2, para una partícula tenemos:

$$v_d = \frac{136\ ml}{240.31\ granos} = \frac{136000\ mm^3}{240.31\ granos} = 565.94\ mm^3/grano$$

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6v_d}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6(565.94)}{\pi}} = 10.26\ mm$$

3.1.3 Densidad de la partícula

Con los resultados de nuestras mediciones experimentales y con la ecuación 3, tenemos:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v_2 - v_1} = \frac{94.2}{230}\frac{gr}{ml} = 409.57\frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_p = \frac{m}{v_{2*} - v_{1*}} = \frac{94.2}{136}\frac{gr}{ml} = 692.65\frac{kg}{m^3}$$

Donde:

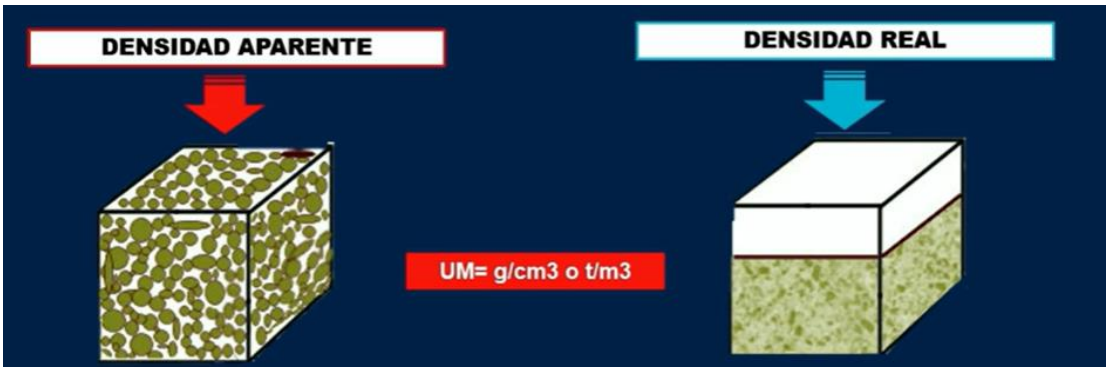
$\rho_{ap} = Densidad\ aparente, kg/m^3$

$\rho_p = Densidad\ real\ de\ las\ ártícula, kg/m^3$

En la Figura 20 se muestra un esquema entre la densidad aparente y la real.

Figura 20

Esquema densidad aparente y densidad real



Nota. Video en Youtube

3.2 Características del lecho

3.2.1 Porosidad mínima de fluidización

Entendiendo que para el momento físico de mínima fluidización las partículas están aún por partir de su reposo, dado que la fuerza de presión del flujo de aire no es suficiente para variar la estructura del lecho; determinamos que la densidad de lecho para este momento es igual a la densidad aparente de la partícula a fluidizar. Utilizando la ecuación 5 y los resultados del apartado 3.1.3. tenemos:

$$\rho_{Lmf} = \rho_{ap} \qquad \rho_s = \rho_p$$

$$\rho_{Lmf} = densidad\ lecho\ en\ mínima\ fluidización$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_{Lmf}}{\rho_s} = 1 - \frac{409.57}{692.65} = 0.409$$

De lo anteriormente descrito, se estiman los parámetros físicos representativos del café arábigo seco utilizado:

Tabla 3

Resumen de parámetros del café arábigo seco utilizado

Densidad real del café	Densidad aparente del café	Diámetro equivalente	Esfericidad	Porosidad min. fluidización
kg/m^3	kg/m^3	mm	ϕ	ε_{mf}
692.65	409.57	10.26	0.62	0.409

Nota. Elaboración propia

3.2.2 Número de Reynolds

Se procedió a utilizar la ecuación 6 para calculo el número de Reynolds:

$$R_e = \sqrt[2]{\left[33.7^2 + 0.0408 * \frac{{d_p}^3 * \rho_1 * (\rho_2 - \rho_1) * g}{\mu^2}\right]} - 33.7$$

Donde:

R_e es el número de Reynolds

d_p es el diámetro equivalente de la partícula (m)=10.26mm=0.01026 m

ρ_2 es la densidad de la partícula (kg/m^3)= ρ_p=692.65 kg/m^3

ρ_1 es la densidad del fluido (kg/m3)=1.18 kg/m^3

μ es la viscosidad del fluido (Pa.s)= 1.85*10^-5 Pa.s

g es la gravedad (9.81 m/s^2)

Para el caso de nuestro café a fluidizar, considerando la Tabla 3 y Tabla 2, tenemos:

$$N_{re} = \sqrt[2]{\left[33.7^2 + 0.0408 * \frac{0.01026^3 * 1.18 * (692.65 - 1.18) * 9.81}{(1.85 * 10^{-5})^2}\right]} - 33.7$$

$$N_{re} = 982.42$$

3.2.3 Caída de presión

Como se mencionó, como premisa para este trabajo de investigación se utilizó infraestructura ya existente en la Universidad de Piura, para lo cual se consideró una cámara de fluidización de diámetro interno con D =215 mm, para nuestro prototipo.

Considerando m =1 kg de café de la muestra a utilizar para la experimentación se calcula:

$$L_{mf} = Altura_{lecho\ en\ mínima\ fluidización} = Altura_{lecho\ estático} = \frac{4\ m}{\pi D^2 \rho_{ap}}$$

$$= 67.25\ mm = 0.06725\ m$$

De la ecuación 9:

$$\Delta P = L_{mf}(1 - \varepsilon_{mf}).(\rho_s - \rho_g).g$$

$$\Delta P = 0.06725\ (1 - 0.409).(692.65 - 1.18).9.81 = 27.50\ Pa$$

3.2.4 Velocidad mínima de fluidización (u_{mf})

Considerando que nuestro número de Reynolds calculado en el apartado 3.2.2 es de 982.42 se determina que el régimen de fluidización esperado es turbulento, considerando el apartado 2.3.2 de nuestro capítulo 2 "Régimen turbulento".

Utilizando la ecuación 18 para determinar la velocidad mínima de fluidización en régimen turbulento, tenemos:

$$u_{mf} = 0.756\left[\frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g\ \varepsilon_{mf}^3 \phi_s d_p\right]^{1/2}$$

Reemplazando datos tenemos:

$$u_{mf} = 0.756\left[\frac{(692.65 - 1.18)}{1.18} * 9.81 * 0.409^3 * 0.62 * 0.01026\right]^{1/2}$$

$$\boldsymbol{u_{mf}} = 1.1946\ m/s$$ [7]

3.3 Cálculo del soplador centrífugo

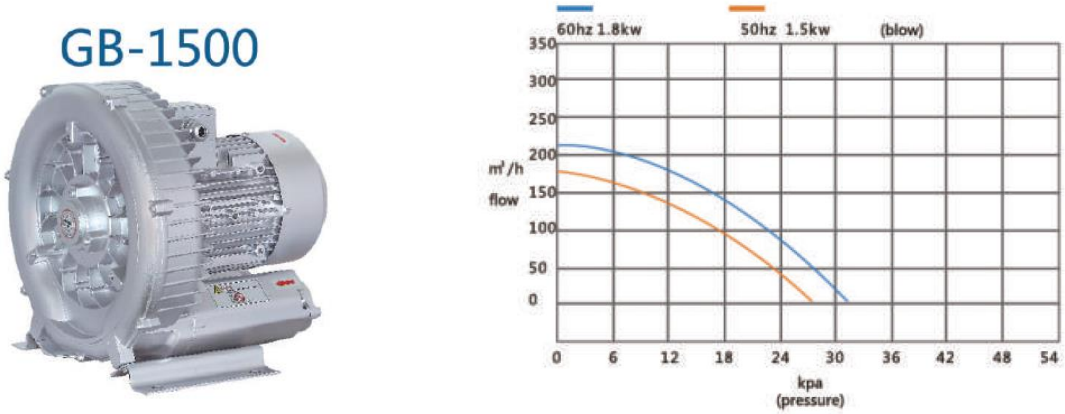
Para verificar que el soplador Blower GB-1500S existente empleado en el gasificador es adecuado para el secador se necesita verificar que el caudal de aire emitido pueda generar al menos una velocidad mínima de fluidización.

Así tenemos, de la especificación técnica del Blower GB-1500S se consideró un punto de la curva de suministro de aire en 150 m^3/h= 0.04167 m^3/s. Además, considerando que el diámetro de la cámara de fluidización es 215 mm calcularemos la velocidad que puede generar este equipo (ver Figura 21).

[7] En (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012) se pueden apreciar valores similares al obtenido en el presente trabajo.

Figura 21

Imagen del blower utilizado



Nota. Data Sheet del equipo

Se recurre a la siguiente ecuación 11:

$$u_o = \frac{V}{A_t} = \frac{4\,V}{\pi D^2} = 1.15\ m/s$$

Donde:

v es el caudal de aire que suministra el Blower GB-1500 en m^3/s

D es el diámetro de la cámara de fluidización (215mm)

Reemplazando en la ecuación tenemos

$$u_o = \frac{V}{A_t} = \frac{4\,V}{\pi D^2} = 1.15\ m/s$$

Por tanto, se verifica que el blower GB-1500 es adecuado para lograr la fluidización del secador.

Para verificar si la velocidad del soplador llega a la velocidad mínima de fluidización, se reubico el sensor de velocidad inicialmente ubicado a la salida del Blower hacia la parte inferior del lecho en la cámara de distribución del aire, con la finalidad de constatar que la velocidad del flujo de aire sea la velocidad mínima de fluidización.

3.4 Diseño de la cámara de secado o columna de fluidización

Para el inicio del proceso de diseño de la cámara de secado, se evaluó el gasificador existente (ver Figura 14), para lo cual el equipo de investigadores consideró rediseñar y construir una nueva cámara para la fluidización de café, considerando:

- Material: Acrílico de 10mm de espesor, con el objetivo pedagógico, de poder visualizar el fenómeno de fluidización y a la vez que este sea resistente mecánicamente.

- Decidimos no cambiar el diámetro interno de la cámara, se considera en 215 mm.

- Para la facilidad del ingreso del café, incorporamos una puerta de acceso a una altura que facilite suficiente espacio para la fluidización. Así mismo se incorporó un jebe de sellado.

- Consideramos un ducto de salida de partículas residuo, en la parte superior que conecta al ciclón.

- Para el proceso de ensamble se consideró las medidas adecuadas de la brida de ingreso a la cámara (inferior) y de la brida de salida a nuestro ciclón de partículas de residuo.

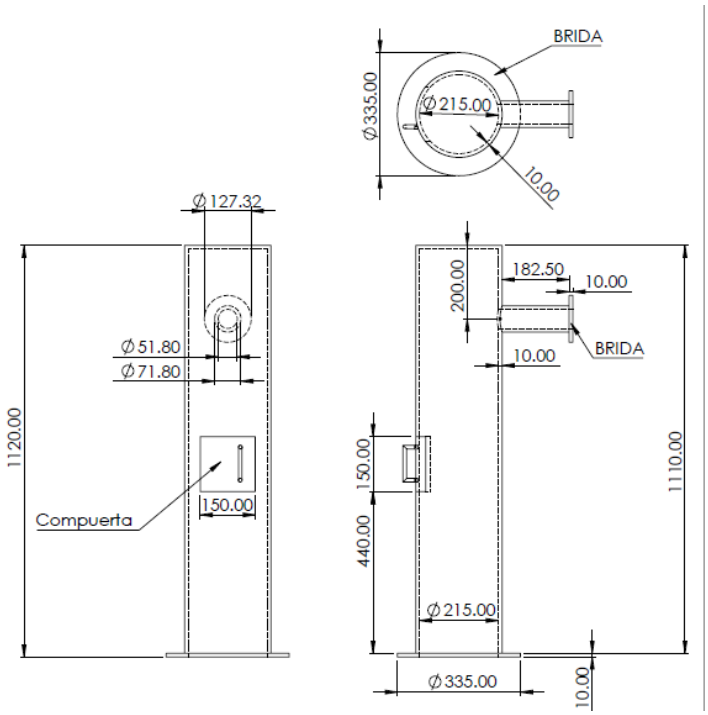
- En la parte superior la cámara es sellada.

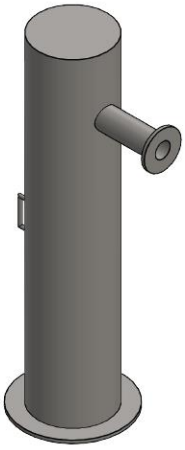
- El diseño se ajustó a la disponibilidad técnica de nuestros proveedores de materiales y manufactura.

El diseño desarrollado se plasmó en los dibujos de gabinetes mostrados en la Figura 22:

Figura 22

Plano y vista en 3D de la cámara de fluidización





Nota. Elaboración propia

Seguido del diseño mencionado, el equipo investigador encargó la construcción de la cámara de referencia, la cual mostramos el avance de la fabricación en la Figura 23:

Figura 23

Construcción cámara de acrílico

Nota. Elaboración propia

Considerando el tiempo necesitado para la fabricación en acrílico (rolado de placa), el equipo investigador encargó la construcción de una cámara de fluidización en acero ASTM A36 de 10 mm de espesor con una ventana de visualización con tapa en acrílico, con lo cual se desarrollaron los ensayos experimentales. Se muestra en la Figura 24.

Figura 24

Cámara de fluidización en acero ASTM A36 de 10 mm de espesor con una ventana de visualización

Nota. Elaboración propia

3.5 Diseño del distribuidor

Para el inicio del proceso de diseño del distribuidor, se evaluó el existente Ref. Foto 3.1., para lo cual, el equipo de investigadores consideró que ese diseño no aplica para nuestra investigación, dado a que la geometría provoca interferencia en el flujo de aire incrementando las perdidas energéticas.

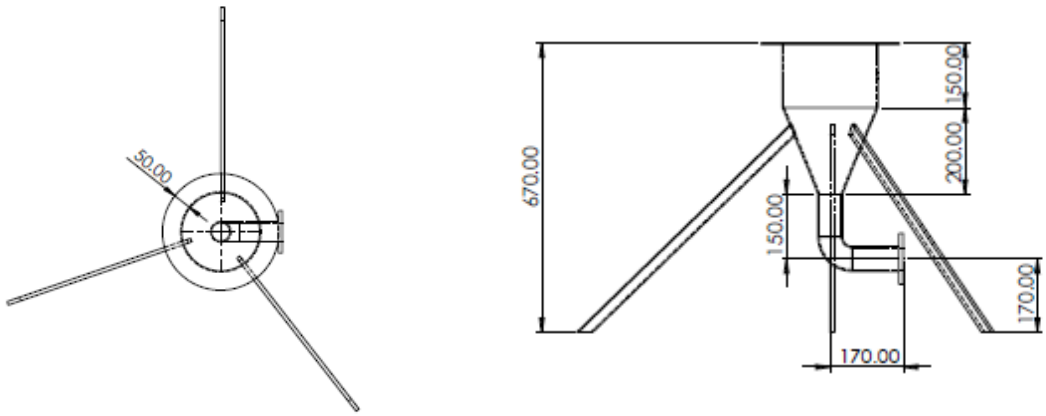
El equipo de investigadores consideró construir un nuevo distribuidor, para lo cual consideramos:

- Material: Acero ASTM A36 con de 2 mm de espesor, considerando que este sea resistente mecánicamente.
- Codo de 2” a 90°.
- Cambio de diámetros de los ductos de 2” a 215 mm con una altura de cono de 200mm, respetando la geometría de la brida de acople de la cámara de fluidización.
- Consideramos una perforación y base para la colocación de un sensor de velocidad de flujo de aire.
- Soporte trípode de estabilización de distribuidor en piso.
- Pintado general del distribuidor.

Lo desarrollado se plasma en el siguiente plano. Ver Figura 25 y Figura 26:

Figura 25

Plano del distribuidor de aire



Nota. Elaboración propia

Figura 26

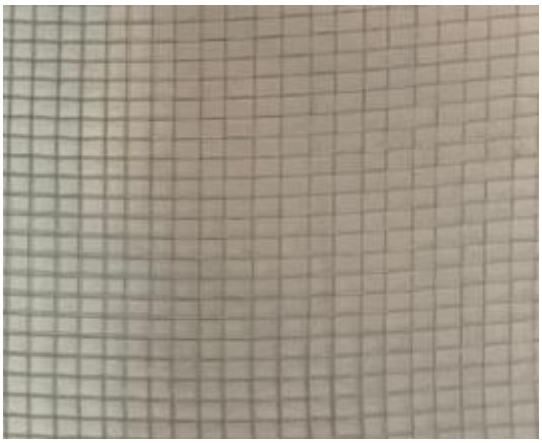
Imagen del distribuidor de aire

Nota. Elaboración propia

Entre la salida del distribuidor y la cámara de fluidización se coloca una empaquetadura de Flexrite; y una malla metálica soporte de tramado 12 x 9 / pulgada (2.82x2.12 mm), para el café a fluidizar, seleccionado considerando que el grano de café a ensayar es de (d_{eq}=10.26 mm). Ambos elementos se pueden visualizar en la Figura 27.

Figura 27

Material empaquetadura y malla metálica



Nota. Elaboración propia

3.6 Diseño del ciclón[8]

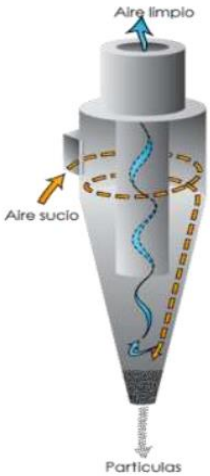
Un ciclón cumple la función de separar las partículas de desecho de la fluidización de los granos, y por otro lado sirve también como instrumento de control de la polución del aire.

Para nuestro diseño hacemos referencia a (Echeverry Londoño, 2006). Ver Figura 28 a y b.

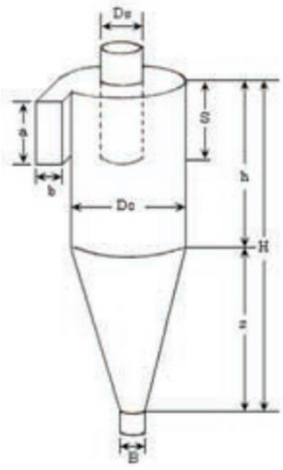
Figura 28

a. Flujos en un ciclón y b. Cotas de ciclón

a.



b.



Nota. Echevarri Londoño (2006)

[8] Este apartado ha sido elaborado utilizando la referencia (Echeverry Londoño, 2006)

Tabla 4

Características de ciclones convencionales

Dimensión		Proporción
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.25
Altura de salida	S/Dc	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5
Altura cilíndrica	h/Dc	2.0
Altura parte cónica	z/Dc	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0
Diámetro salida de partículas	B/Dc	0.25
Factor de configuración	G	402.88

Nota. Echevarri Londoño (2006)

Las dimensiones de la sección de ingreso es de 2 x 4 pulgadas, siendo estas las dimensiones a y b indicadas en la figura 25. A partir de ello se calculan el resto de las dimensiones según las proporciones recomendadas por Echeverri Londoño, 2006 para ciclones convencionales.

Tabla 5

Características del ciclón

Dimensión		Proporción	Dimensión Pulg (mm)
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	8 (203)
Altura de entrada	a/Dc	0.5	4 (102)
Ancho de entrada	b/Dc	0.25	2 (51)
Altura de salida	S/Dc	0.625	5 (127)
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	4 (102)
Altura cilíndrica	h/Dc	2.0	16 (406)
Altura parte cónica	z/Dc	2.0	16 (406)
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	32 (812)
Diámetro salida de partículas	B/Dc	0.25	2 (51)

Nota. Elaboración propia

Verificamos que el ciclón existente en nuestra Universidad, parte de un gasificador, estaba en buenas condiciones operativas, por lo cual lo utilizamos para nuestro secador. En la Figura 29 se muestran imágenes del ciclón utilizado.

Figura 29

Imagen del ciclón existente

Nota. Elaboración propia

3.7 Accesorios y equipos de control

Hemos requerido para nuestro prototipo los siguientes accesorios:

- Transmisor de velocidad de aire FTS34-4011-0MD

Figura 30

Transmisor FTS34-4011-0MD

Nota. Estado de DIPS. Elaboración propia

- Variador de frecuencia ATV12HU15M2, para regular la velocidad del soplador centrífugo.

Figura 31

Variador de frecuencia ATV12HU15M2

Nota. Elaboración propia

- Laptop Dell XP con software de control para el variador

Figura 32

Laptop DELL XPS

Nota. Elaboración propia

3.8 Ensamble del secador

Mostramos en la Figura 33 nuestro prototipo de secador de lecho fluidizado ensamblado:

Figura 33

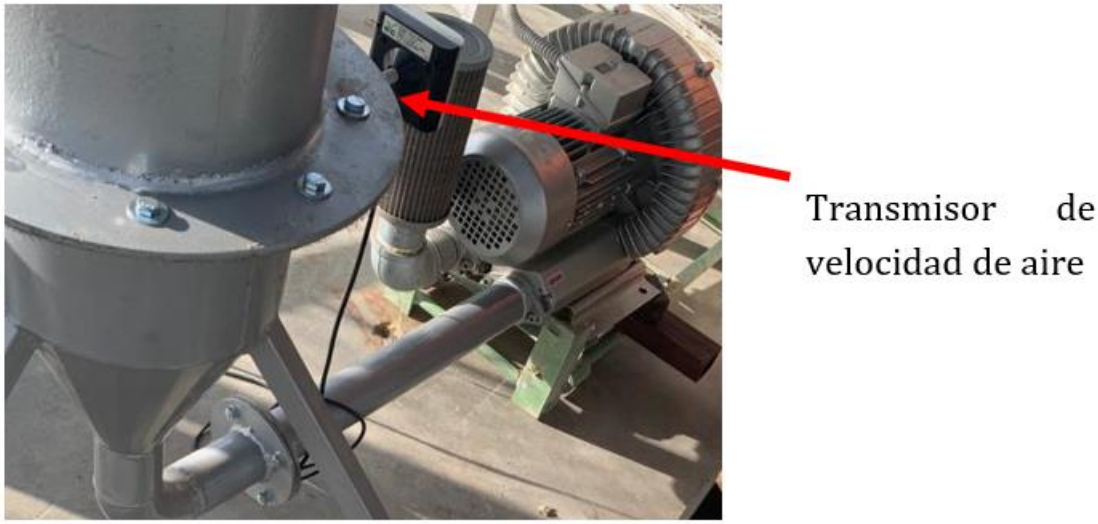
Prototipo de secador de lecho fluidizado

Nota. Elaboración propia

En la figura 34 se muestra un detalle del sistema de admisión.

Figura 34

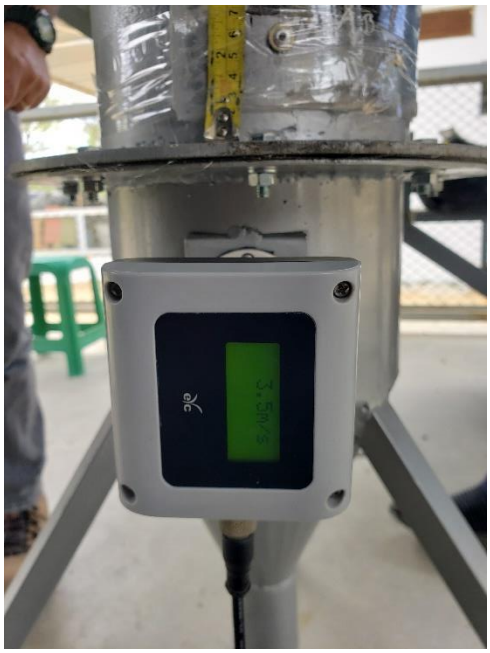
Detalle sistema de admisión de aire



Nota. Elaboración propia

Figura 35

Detalle de medición del sensor de aire



Nota. Elaboración propia

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Capítulo 4

Pruebas experimentales y presupuesto

4.1 Pruebas experimentales

Con nuestro prototipo ensamblado ver Figura 14, el equipo de investigadores desarrolló ensayos, con el principal objetivo de verificar que se produce una fluidización de café arábigo seco, con lo evidenciado, se construyó la Tabla 6 y Tabla 7:

Tabla 6

Resultados de ensayos en vacío

Ensayo	Frecuencia (Hz)	U_{0v} (m/s)
1	30	1.2
2	40	2.6
3	50	3.4

Nota. Elaboración propia

Donde:

u_{0v} : Velocidad del aire medido en vacío.

La Tabla 6, para el ensayo sin carga de café, nos muestra la variación de las velocidades medidas en el punto de ubicación del sensor (dentro del componente distribuidor, colocado previo al lecho de fluidización). Se considera la influencia de la geometría del componen distribuidor, desde la descarga de aire de Blower hasta el punto de medición, esto al comparar la curva característica del Blower proporcioda por el fabricante, dado para distintas frecuencias reguladas en el variador.

Tabla 7

Resultados de ensayos con carga de café

Ensayo	Masa (kg)	$Altura_{Lecho\ estático}$ (mm)	u_{mf}. M (m/s)	$Frecuencia_m$ (Hz)	Altura Lecho Dinámico (mm)	$u_{f.\ M}$ (m/s)	$Frecuencia_d$ (Hz)
1	0.50	35	3.0	35	100	3.5	40
2	1.00	65	3.5	40	150	4.0	45
3	1.50	95	4.0	55	200	4.5	50
4	2.00	135	4.5	50	250	5.2	55
5	2.50	165	5.2	55	300	5.8	60

Nota. Elaboración propia

Donde:

u_{mf}. M: Es la velocidad de mínima fluidización indicada por el sensor colocado en el distribuidor previo a la entrada de la cámara de fluidización.

uf. M: Es la velocidad de fluidización estabilizada, indicada por el sensor colocado en distribuidor previo a la entrada de la cámara de fluidización.

$Frecuencia_m$: Es la frecuencia a la cual se está regulando el variador del blower GB-1500S, en el momento de mínima fluidización.

$Frecuencia_d$: Es la frecuencia a la cual se está regulando el variador del blower GB-1500S, para una fluidización estabilizada.

Altura Lecho Dinámico (mm): Es la altura del lecho aproximada en fluidización estable.

De la Tabla 7, podemos resumir:

Con nuestro prototipo logramos fluidizar granos de café arábigo. Con diferente cantidad de masa depositada en el lecho. Desde 0.5 kg hasta 2.5 Kg.

Mostramos la variación de las velocidades de mínima fluidización, Con un promedio de la u_{mf} en 4.0 m/s y 47 Hz en la regulación de la velocidad del Blower. Y una desviación estándar de 0.86 m/s.

Registramos valores característicos de referencia de la altura de lecho dinámico estabilizado.

Del ensayo realizado mostramos imágenes representativas en las Figuras 36, 37 y 38.

Figura 36

Lecho estático con 1.5kg de café

Nota. Elaboración propia

Figura 37

Fluidización de 1kg de café

Nota. Elaboración propia

Figura 38

Fluidización de 1.5kg de café

Nota. Elaboración propia

De la Tabla 8, Calculamos la porosidad del lecho en régimen estabilizado $\varepsilon_{f:}$:

Tabla 8

Cálculos de porosidad en lecho fluidizado

Ensayo	Masa (kg)	Volumen aparente m^3 * 10^3	Densidad aparente (kg/m^3)	Porosidad del lecho E	Δ Crecimiento Lecho %
1	0.50	3.63	137.72	0.80	186%
2	1.00	5.45	183.63	0.73	131%
3	1.50	7.26	206.58	0.70	111%
4	2.00	9.08	220.36	0.68	85%
5	2.50	10.89	229.54	0.67	82%

Nota. Elaboración propia

De la tabla 6 y Tabla 7, hacemos comparaciones de la velocidad medida en vacío y con carga de café. Ver Tabla 9:

Tabla 9

Comparaciones de la velocidad media en vacío y con carga de café

Ensayo	Frecuencia (Hz)	u_{0V} (m/s)	Masa (kg)	$u_{mf.M}$ (m/s)	Δ Velocidad %
2	40	2.6	1.00	3.5	35%
4	50	3.4	2.00	4.5	32%

Nota. Elaboración propia

4.2 Presupuesto

Para reducir el monto del prepuesto de investigación, fue importante el apoyo de las instalaciones y equipos de la UDEP, en especial al contar con un equipo gasificador, de tesis previamente mencionadas.

Detallamos presupuesto en la Tabla 10.

Tabla 10

Presupuesto

1.-Gastos de personal					
Descripción	Cantidad	Tiempo Unt. (Horas)	Total (Horas)	Valor (S/ x hora)	Total S/
Investigadores	3	140	420	30.00	12600.00
Asesor principal	1	60	60	40.00	2400.00
Asesor consultor	1	20	20	50.00	1000.00
				Sub-Total	16000.00
2. Recursos o suministros					
Descripción	Cantidad	UM	Observación	Valor Unitario (S/)	Total S/
Facilidades: Plataforma Zoom, Laboratorios, equipo quemador existente.	3	Unidad	UDEP	1000.00	3000.00
Internet	220	Horas	Investigadores	1.00	220.00
Café arábigo para ensayos	5	kg	De Ayabaca, Piura	18.00	90.00
Laptop	3	Unidad	Investigadores	50.00	150.00
				Sub-Total	3460.00
3.- Equipamiento					

Descripción	Cantidad	UM	Observación	Valor Unitario (S/.)	Total S/
Cámaras de fluidización: Acrílico + acero	1	Unidad	Fabricación local	1762.00	1762.00
Distribuidor	1	Unidad	Fabricación local	800.00	800.00
Malla base de lecho fluidizado	1	Unidad	Ferretería	10.00	10.00
Soplador GB1500S	1	Unidad	Existente en UDEP	0.00	0.00
Ciclón	1	Unidad	Existente en UDEP	0.00	0.00
Tablero e instrumentación: Sensor de velocidad FTS34-4011-0MD.	1	Unidad	Existente en UDEP	0.00	0.00
				Sub-Total	2572.00
5.- Viajes					
Descripción	Cantidad	UM	Observación	Valor Unitaro (S/.)	Total S/
Viaje a Piura	3	Viaje	01 Investigador reside fuera de Piura	325.00	975.00
				Sub-Total	975.00
6.- Otros gastos					
Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Observación	Valor Unitario (S/.)	Total S/
Energía Eléctrica	9	kWh	Ambientes UDEP	1.10	9.90
Movilidad local y encomiendas	1	unidad	Traslados en compras	130.00	130.00
Silicona, pernos, empaquetadura flexrite.	1	unidad	Para el ensamble	20.00	20.00
				Sub-Total	159.90
				Total	23166.90

Nota. Elaboración propia

Conclusiones

Se logro diseñar y construir un primer prototipo de secador de café por lecho fluidizado, logrando la fluidización de los granos de café arábigo ensayado, para masas de hasta 2.5kg

Se determinó propiedades del grano de café arábigo ensayado, como es el diámetro equivalente en 10.26 mm, densidad real del grano en 692.65 kg/m^3, densidad aparente en 409.57 kg/m^3. Además, con las formulaciones matemáticas referidas se determina una porosidad en mínima fluidización de 0.409 y una velocidad mínima de fluidización teórica en u_{mf}=1.1946 m/s.

En los ensayos de mínima fluidización, tenemos resultados de registros en el punto medición de velocidad del aire que ingresa a la cámara de fluidización en un rango de 3 a 5.2 m/s, con un promedio de 4 m/s y desviación estándar de 0.86 m/s. Estas velocidades son superiores a la velocidad de mínima de fluidización teórica calculada en 1.19 m/s. Inferimos que la variación se debe a la tecnología del sensor, a la ubicación de este y a los fenómenos de turbulencia por aspectos geométricos y estructurales de nuestro distribuidor; así como la variación de tamaños de los granos de café.

Durante los ensayos, se verificó que las velocidades de mínima fluidización se incrementan con variación de la masa de café ingresada en lecho de la cámara de fluidización. Inferimos que se debe pérdidas de energía en el flujo de aire al interior del lecho cargado de café.

Con nuestro prototipo se evidencia la variación de las porosidades del lecho fluidizado a diferentes cargas de café. Así mismo se visualiza que el porcentaje de café que nunca llega a fluidizar varía.

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Referencias bibliográficas

Carman, P. (1956). *Flow of gases through porous media.* New York.

Choque , A. (2021). *Evolución de la exportación de café: 2010-2020.* Trabajo de investigación para optar el grado académico de bachiller en Ingeniería Industrial, Universidad de Lima.

Echeverry Londoño, C. (2006). *Diseño óptimo de ciclones.* Revista Ingenierías Universidad de Medellin.

etw cloud. (12 de 2022). Obtenido de https://mx.etwinternational.com/1-3-1-batch-type-fluid-bed-dryer-34033.html

Gonzales Sánchez. (2009). *Diseño y contruccion de un secador por fluidización para la deshidratacion de trigo.* Tesis de grado para la obtención de título de ingeniero químico , Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Gonzales Susatama. (2014). *Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado.* Tesis presentada para obtar el grado título de magister en ingeniería agrícola, Univesidad Nacional de Colombia.

González Susatama , L. (2014). *Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado .* Facultad de Ingeniería . Bogotá, D.C., Colombia : Universidad Nacional de Colombia .

Google maps. (s.f.). Obtenido de https://www.google.com/maps/place/5%C2%B010'15.2%22S+80%C2%B038'17.1%22W/@-5.1708956,-80.6402579,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x0:0xae7ede650b639b85!8m2!3d-5.1708956!4d-80.6380692?hl=es

Jácome Ramirez, M. (2015). *Condiciones de operación de un secador de lecho fluidizado en el procesamiento de hoja de buganvilla para la infusión rica en betalaínas.* Tesis para obtener el título de master en ciencias en proceso biológicos, Universidad de Veracruz, Orizaba, México.

Jaramillo Calle, A., & Narváez Quiranza, E. (2012). *Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización e implementación del control de Flujo y Temperatura.* Tesis para obtar el título de ingeniero en electrónica y control .

Lopez Fontal , E. (2017). Secado de café en lecho fluidizado. *Revista Ingeniería e investigación ISSN: 0120-5609., vol. 26, núm. 1, abril, 2006, pp. 25-29*. Obtenido de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326102

Martín , I., Salcedo , R., & Font, R. (2011). *Mecánica de Fluidos.* Universidad de Alicante. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/9/tema4_flujo%20externo.pdf

Maupoey, P., Andrés Grau, A., Barat Baviera, J., & Albors Sorolla, A. (2020). *Introducción de alimentos por aire caliente.* Editorial Universitat Politécnica de Valencia. Obtenido de ISBN: 978-84-9705-025-8

Mendieta Bojorge, R., & Picado Rivera, A. (2002). *Diseño tecnológico de un sistema separador - secador para su utilización en la recuperación de cerveza residual posterior secado de la levadura sobrante.* Tesis para optar el título de ingeniero químico, Universidad Nacional de Ingeniería , Managua, Nicaragua.

Mohsenin, N. (1970.). Physical Properties of Agricultural Products. *ransactions of the American Society of Agritultural Engineers*, vol. 8., no. 1, p. 25-29.

Mondragón, R., Julia, J., Barba, A., & Jarque, J. (2013). El proceso de secador por atomización: Formación de gránulos y cinética de secado de gotas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol 52,4,159-168*. doi:doi:10.3989/cyv.212013

Tsung Hsing. (12 de 2022). Obtenido de https://www.tsunghsing.com.tw/es/product/continuous_fluidized_bed_dryer.html

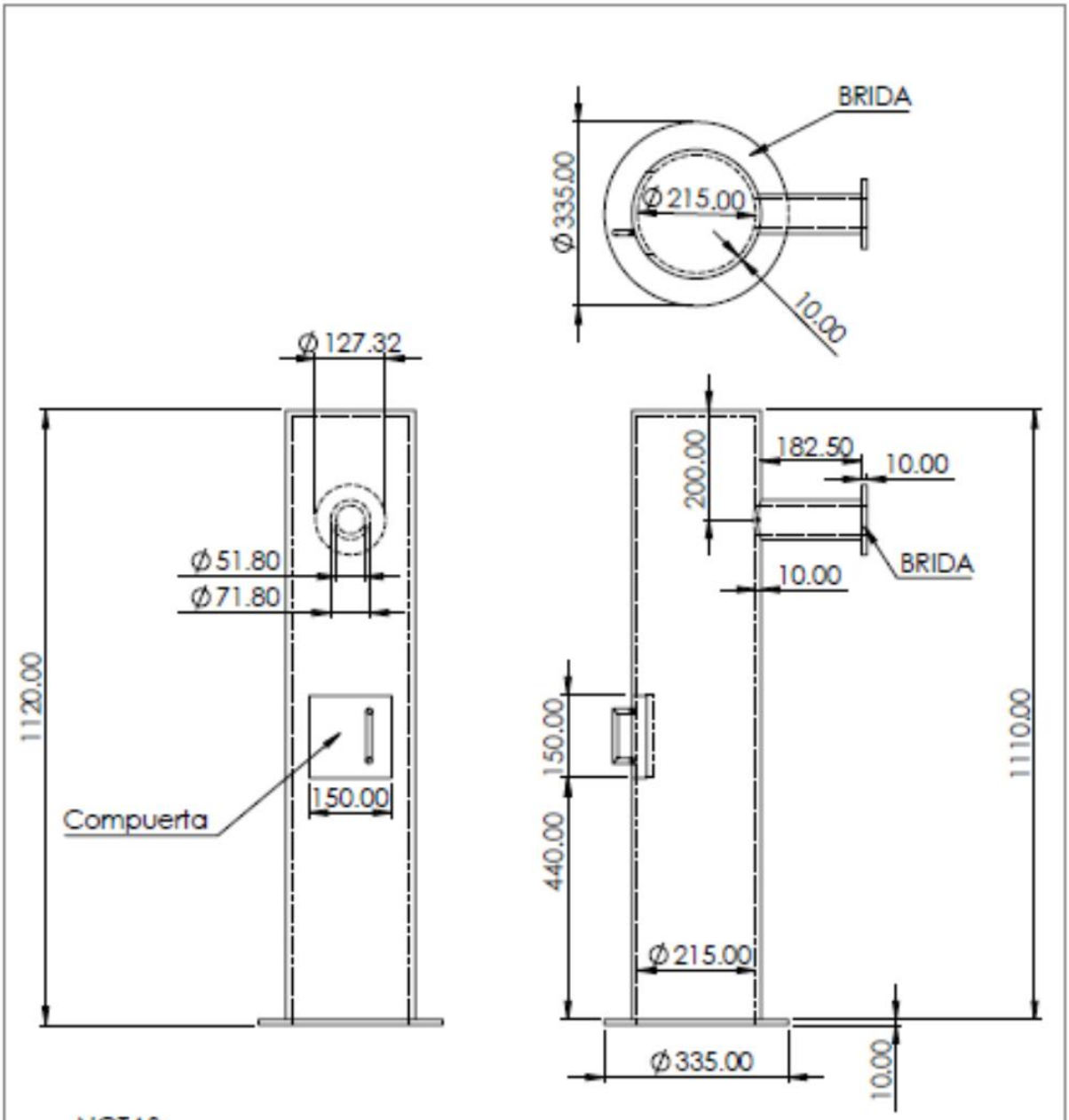
Unigarro Bolaños, D. (2007). *Secado de café arabigo coffea arábica L. de la variedad caturra mediante lecho fluidizado.* Tesis para la obtención del título de ingeniero Agroindustrial , Universidad técnica del norte , Ibarra, Ecuador.

Urrutia Sánchez, R. (2006). *Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para Biomasa Forestal.* Universidad Austral de Chile.

Planos

UNIVERSITAS • STUDIORUM • PIURENSIS •

Plano 1 Plano de la cámara de secado



NOTAS:

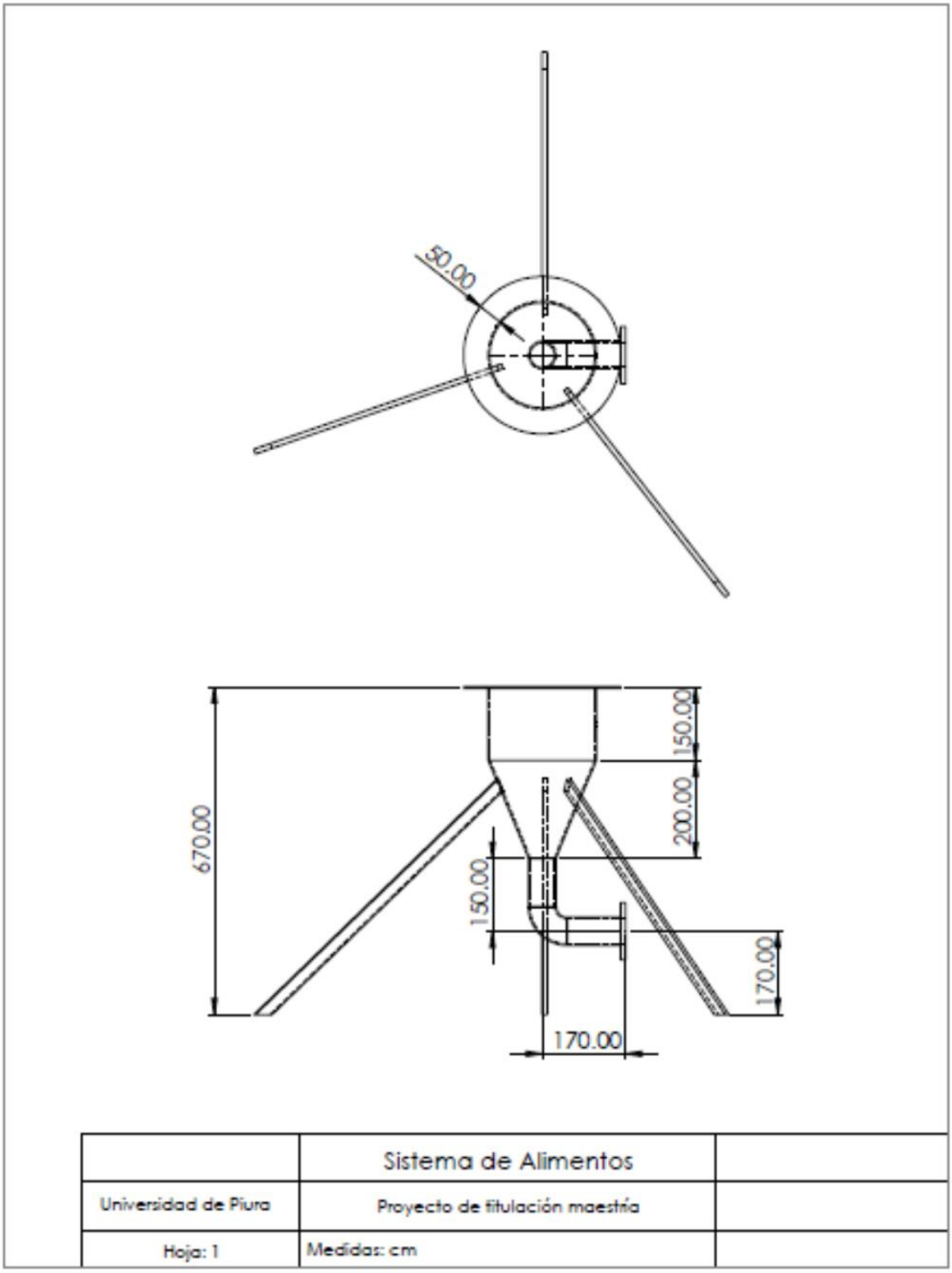
- La compuerta debe estar "hermeticamente cerrerrada, puesto dentro del cilindro circulará aire. Se recomienda poner empaquetadura en los bordes de la compuerta.
- La brida de diámetro 335 mm debe tener una empaquetadura.

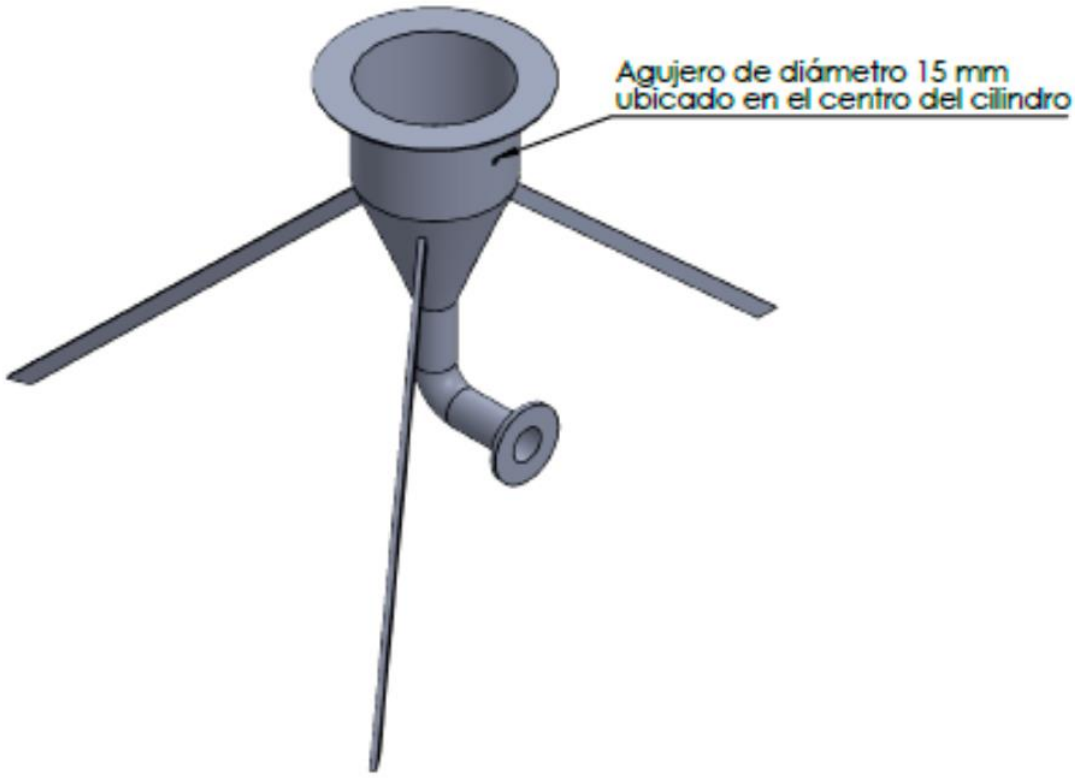
	Cámara de secado	
Universidad de Piura	Proyecto de titulación maestría	
Hoja: 1	Medidas: cm	

	Cámara de secado	
Universidad de Piura	Proyecto de titulación maestría	
Hoja: 3	Medidas: cm	

	Cámara de secado	
Universidad de Piura	Proyecto de titulación maestría	
Hoja: 2	Medidas: cm	

Plano 2 Plano del distribuidor





	Sistema de Alimentos	
Universidad de Piura	Proyecto de titulación maestría	
Hoja: 2	Medidas: cm	