

# Diseño y construcción de un secador de Lecho Fluidizado a escala para Laboratorio

## Design and construction of a Scale Fluidized Bed Dryer for Laboratory

Emerita Delgado-Plaza<sup>1</sup>, Ernesto Martínez, Juan Peralta-Jaramillo<sup>1</sup>, Fausto Maldonado, Jose Reinoso-Tigre, Pablo Torres and María Carrión

<sup>1</sup>ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, CDTS-FIMCP, Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. eadeldgad@espol.edu.ec, emartine@espol.edu.ec, jperal@espol.edu.ec, famaldon@espol.edu.ec, josirein@espol.edu.ec, paantorr@espol.edu.ec, madecarr@espol.edu.ec.

**Resumen**— El proceso de secado es la etapa más importante requerida para la conservación de los granos, cereales y hortalizas, evitando de esta manera la generación de hongos, permitiendo de esta forma que el producto se conserve por más tiempo [1]. Por ello, existen varios proyectos donde se involucran pruebas en los laboratorios de las Instituciones Educativas Superior, para ayudar en temas de tecnología y conservación del alimento a las empresas y comunidades agrícolas. La valoración de las tecnologías de secado se da a partir de determinar el tiempo, temperatura, humedad y velocidad de secado de cada alimento. A través de una matriz de valoración se ha seleccionado un tipo de secador, que será presentado en este trabajo, cuyo objetivo es realizar el diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado para el secado de 2 kg de muestra húmeda, aplicando la reutilización de materiales (Economía circular) con la finalidad de reducir el costo de construcción. Iniciamos seleccionando la metodología utilizada para la elaboración del prototipo, análisis de ingeniería de cada parte de equipo, construcción y prueba funcional del equipo de lecho fluidizado a escala de laboratorio. Como resultado se obtuvo un equipo que funciona entre temperaturas de 50°C a 70°C, velocidades regulables entre 4 a 11 m/s, tiempo de secado 8 horas, consumo de 1.7 kW/h, ahorro de construcción del 40%. Finalmente, podemos concluir que es posible la construcción de tecnología de secado a escala para laboratorio donde se debe considerar dentro del diseño la fuente principal de energía, área disponible, ruido y vibraciones, además se debe suministrar un flujo laminar que permita un secado homogéneo del producto.

**Palabras claves:** lecho fluidizado, energía, secado, equipo de laboratorio

**Abstract.** The drying process is the most important stage required for conserving grains, cereals, and vegetables, thus avoiding the generation of fungi, allowing the product to be preserved for longer [1]. Therefore, there are several projects where tests are involved in the laboratories of Higher Educational Institutions to help with technology and food conservation issues for companies and agricultural communities. The drying technologies are assessed by determining each food's time, temperature, humidity, and drying speed. Through a valuation matrix, a type of dryer has been selected, which

will be presented in this work, whose objective is to design and build a fluidized bed dryer for drying 2 kg of a wet sample, applying the reuse of materials (Circular economy) to reduce the cost of construction. We start with the applied methodological scheme for the design, engineering analysis of each part of the equipment, construction, and functional test of fluidized bed equipment at laboratory scale. As a result, the equipment works between temperatures of 50 ° C to 70 ° C, adjustable speeds between 4 to 11 m / s, drying time 8 hours, consumption of 1.7 kW / h, whit construction savings of 40%. Finally, we can conclude that it is possible to build drying technology on a laboratory scale where must consider the main source of energy, available area, noise, and vibrations within the design; in addition, a laminar flow must be supplied that allows a homogeneous drying of the product.

**Keywords**—Fluidized bed, energy, dryer, laboratory equipment

### I. INTRODUCCIÓN

La deshidratación de alimento tanto en frutas, granos, cereales y verduras es empleada con el objetivo de disminuir el riesgo de contaminación y a la vez aumentar la vida útil del alimento sin que estos pierdan sus propiedades originales. Es por ello, que la tecnología de secado es comúnmente utilizada para deshidratar productos de mediada a gran capacidad para su conservación [1] [2].

Partiendo del análisis de necesidad del cliente, el secador diseñado se utilizará para fines educativos (teórico y práctico) para la carrera de alimentos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Los requerimientos a considerar dentro del análisis son; capacidad de operación 2 kg de materia prima, temperatura de operación entre 50°C a 70°C a una presión de 1 atmósfera, velocidad del aire caliente variante que permita al producto elevarse en la última etapa del proceso de secado, fácil de utilizar para el operario (60% lo utilizaran el género femenino) , factibilidad para el cambio de bandejas , pocas piezas para el ensamblaje, equipo móvil , periodo de mantenimiento una vez al año, materiales a utilizar deberá de cumplir con las normas de seguridad alimenticia. El equipo será abastecido por energía eléctrica, de esta manera se evitará problemas de seguridad por uso de combustibles fósiles en el

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

área de laboratorio. Además, el secador se utilizará para uso experimental en la deshidratación de alimentos con la finalidad de determinar el proceso óptimo del secado del producto.

En el mercado existen varios modelos de secadoras, entre ellas; secador de bandeja, secador rotatorio, secadores de banda, dieléctricos, túnel, cascada y de lecho fluidizado [1] [3]. Realizando un análisis entre ellas la tecnología utilizada por secadores de lecho fluidizado es de alta efectividad, la transferencia de calor que se da en la recámara ocurre en toda la superficie del producto por lo cual es ideal en el secado de granos y muestras de pequeño tamaño [4]; Además, a la necesidad de laboratorio se considera aplicable su uso para otros productos tales como frutas. Algunos de los distintos equipos de lechos fluidizados (LF) son [1] [5]: Secador de LF estacionario, secador de LF vibratorio, granulador/procesador LF. Los equipos de secado más habituales en los laboratorios son el tipo bandeja, tienen facilidad a mantenimientos, manejos prácticos y fácil limpieza [5].

A partir de lo expuesto anteriormente, se pretende realizar el diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado a nivel de laboratorio, que permita el análisis experimental del producto alimentario durante las distintas etapas del proceso de secado.

#### A. Secador de lecho fluidizado

En la industria existen diferentes secadores de lechos fluidizados, los cuales se clasifican por su condición de flujo en; dinámicos, estáticos e híbridos [6]. Los secadores fluidizados que existen en el mercado están contruidos para la producción industrial, razón por la cual su capacidad es mucho mayor a la que requiere los laboratorios, así como su costo excede un presupuesto definido.

El funcionamiento de un secador de lecho fluidizado se basa en introducir aire caliente a alta presión por medio de un lecho perforado de partículas sólidas húmedas, donde La superficie de cada partícula individual es expuesta para su secado al suspenderla en el flujo de aire, lo que resulta en una mejor transferencia de calor y en un menor tiempo de secado. [7] [5]

**Lecho Fluidizado estático:** este tipo de lecho es ideal para productos que fluyen libremente. El secador puede ser de lotes o continuo y tener una estructura rectangular o redonda [5]. El lecho fluidizado estático es más liviano y barato que el dinámico debido a que no poseen un sistema de accionamiento mecánico para darle movimiento al producto [6].

**Lecho Fluidizado dinámico:** los secadores generan un movimiento de sacudida del lecho fluido (no realiza vibración), y son convenientes para: materiales que tiene una amplia distribución del tamaño de partícula, materiales pegajosos, materiales sensibles a la temperatura y materiales frágiles. [5]. En la tabla 1, se presenta la ventajas y desventaja de utilizar la tecnología de lecho fluidizado.

TABLA I  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO [5] [7]

Ventajas	Desventajas
Alta transferencia de calor entre el fluido del aire caliente y el producto	La reducción del porcentaje de secado de un lecho fluidizado estático es menor al dinámico
El comportamiento de la partícula permite que el proceso sea fácil y manipulable.	Requiere material cortado para evitar reducir la efectividad del proceso
La velocidad de transferencia de calor dentro del lecho necesita superficies pequeñas, haciendo ideal la experimentación de productos.	No es adecuado su uso, para alimentos de diferentes densidades
Requiere poco mantenimiento	No es adecuado el uso para alimentos que se adhieran a las paredes
Ahorra hasta el 20% menos energía	El equipo requiere más espacio en longitud (alto) para mantener un flujo laminar.

## II. METODOLOGÍA

### A. Metodología del diseño

Es claro que el desarrollo de un diseño para llevarlo a escala de prototipado no consiste en que todo lo que se diseña sea un nuevo invento o sea modificado, o, cumpla con los planos de construcción establecidos, va más allá de ello, donde se debe de establecer varias etapas del proceso iniciando desde la problemática a resolver, condiciones del cliente, diseño forma y estructura del producto. Existen varios modelos en la literatura establecidos para el desarrollo de productos bajo estructuras de innovación y creatividad [8] [9]. Entre los modelos existentes están; Norma de diseño Alemana VDI 2221 [10], Modelo propuesto de Ullman y Jones [11], Modelo de Pahl y Beitz [11], y el modelo SMART [12], en la tabla II, se presenta las etapas de cada modelo. Dichos modelos partes del análisis del mercado, continuando con la etapa conceptual del diseño a través de ideas / alternativas para la solución del problema, posteriormente se selecciona la mejor alternativa, selección de materiales, forma y realizan planos. En cambio, el modelo de SMART llega a la etapa de construcción y análisis del producto al público. [13]

TABLA II  
MODELOS PARA DISEÑOS DE PROTOTIPOS

Etapas Norma de diseño alemana VDI 2221 [10]	Etapas Modelo ULLMAN & JONES [11]	Etapas Modelo Pahl & Beitz. [11]	Etapas Modelo SMART. [12]
Definición del producto	Definición del proyecto y la planificación	Planificación y clarificación	Planificación y análisis
Diseño conceptual	Especificación	Diseño conceptual	Diseño
Diseño de materialización	Diseño conceptual	Realización	Prototipo e Implementación
Diseño en detalle	Desarrollo del producto	Detalle del diseño	Testeo

Existe otro modelo metodológico más detallado como es el *modelo de diseño de procesos* [14], que permite evaluar el

diseño inicial hasta llegar a la construcción. A partir de la información recopilada se ha seleccionado las etapas que consideramos más importante para el proceso del diseño y del desarrollo del prototipo. A continuación, se presenta la metodología o etapas del proceso:

- a) *Problemática o necesidades del proyecto*; es necesario tener una relación entre el cliente, profesores y los estudiantes de las carreras de ingeniería mecánica estableciendo de esta forma los parámetros de funcionalidad y necesidad.
- b) *Diseño de forma*: Se revisan y evalúan informaciones bibliográficas sobre; patentes, parámetros de construcción, implementación y adaptación de equipos.
- c) *Selección de alternativa*: Se establece la matriz de decisiones. La Alternativa de solución debe satisfacer los principales requerimientos del cliente, lo cual se socializa el diseño.
- d) *Diseño de forma*: se analiza materiales, formas de diseño, Normas y simulación del equipo utilizando programas computacionales.
- e) *Diseño de los elementos y construcción del prototipo*. En esta etapa se realizan planos detallados de cada pieza y plano general del prototipo. Se realiza la construcción a escala que sea posible validarlo funcionalmente.
- f) *Pruebas del prototipo y socialización*: Se realizan pruebas del prototipo para validar la funcionalidad y el manejo con el operador, en caso falla se debe de empezar con el rediseño
- g) *Análisis de resultados*: a partir de los resultados se desarrolla el equipo final.
- h) *Documentación*: Se documenta el procedimiento a seguir para el desarrollo del equipo con la secuencia de pasos, cumpliendo con todas las normativas y requisitos para un buen desarrollo del producto final.

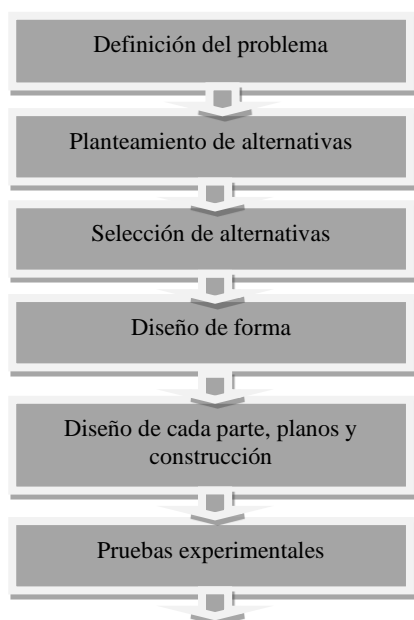


Fig. 1 Metodología utilizada para el Desarrollo del prototipo.

### B. Análisis del Diseño

El diseño del secador se basará a partir de lo establecido en la normativa técnica NTE INEN 2996 (Servicio Ecuatoriano de Normalización-INEN), regida para la deshidratación de producto alimentarios.

El diseño inicia en determinar las partes del secador tales como; cámara de secado, tipos resistencia, cono de transición, área de extracción de aire, porta-bandeja y lecho fluidizado, ventilador, sistema de control, motor. Se inicia con la recolección de materiales metálicos reutilizables que nos servirán para el cuerpo del secador, se breve utilizar placas de acero inoxidable nuevos con grado alimentario en el interno de la cámara del secador. Posteriormente se determina la fuerza involucrada para el movimiento de la partícula, fuerza de sustentación, velocidad terminal y del ventilador, flujo másico, cálculo malla, potencia del motor.

#### Fuerza de sustentación

El análisis se desarrolla considerando una partícula, donde se busca identificar todas las fuerzas que se involucran en el producto [5]. La fuerza de sustentación ( $F_s$ ) es la ejercida sobre el cuerpo por el fluido y la fuerza de arrastre ( $F_a$ ) es generada cuando el cuerpo viaja a través del fluido, por lo tanto, esta última no va a ser considerada. En la ecuación 1 se presenta la ecuación utilizada, y en la figura 2 se plantea las fuerzas ejercidas en la partícula.

$$F_s = \frac{(C_d * \rho_{aire} * v_T^2 * \pi * D_{producto}^2)}{8} \quad (1)$$

$C_d$ : coeficiente de arrastre,  $\rho_{aire}$ : densidad del aire,  $v_T$ : velocidad terminal,  $D$ : diámetro del producto.

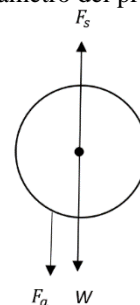


Fig. 2 Fuerzas ejercidas en la partícula.

#### Velocidad Terminal

La velocidad terminal es la máxima velocidad que puede obtener un cuerpo que se mueve a través de un medio que se

opone a su movimiento, en la ecuación 2 se presenta las variables involucradas [5].

$$v_T = \sqrt{\frac{2 * F_s}{C_d * \rho_{aire} * A_R}} \quad (2)$$

Dónde:  $F_s$ , fuerza de sustentación,  $C_d$ ; coeficiente de arrastre,  $A_R$ ; área transversal del producto;  $\rho_{aire}$ ; densidad del aire.

### Flujo másico en recámara de secado

El flujo o caudal másicos es una medida que mide el número de moléculas que fluye en un gas en una determinada cantidad de tiempo, en la ecuación 3 se presenta las variables involucradas:

$$m_{e-salida} = \rho_{aire} * A_{agujero} * V_t * n_T \quad (3)$$

$\dot{m}_e$  : flujo másico,  $\rho_{aire}$ : densidad del aire,  $A_{agujero}$ : área del agujero de la malla,  $n_T$ : número de orificios,  $V_t$ : velocidad terminal.

### Flujo másico en transición rectangular

El efecto Venturi sucede cuando un fluido disminuye su presión al aumento de su velocidad, este efecto está dado por la ecuación de la continuidad y el principio de Bernoulli” [5]

Podemos visualizar este efecto en la transición rectangular del secador, para determinar la velocidad utilizaremos la siguiente ecuación Bernoulli (Ecuación 4):

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 \quad (4)$$

Donde; P: presión atmosférica,  $\rho$ :densidad ,  $V_1$  y  $V_2$ : velocidad de la recamara y velocidad de la sección rectangular respectivamente,  $h_1$  altura de la recamara,  $h_2$  altura de la sección rectangular.

Conociendo que las presiones dentro del secador son prácticamente iguales, se plantea la siguiente ecuación 5.

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - 2g(h_2 - h_1)} \quad (5)$$

Por otra parte, también se calcula el flujo másico de la transición rectangular, a partir de la ecuación 6.

$$\dot{m}_{transición} = \rho_{aire} * V_2 * A_{trans} \quad (6)$$

Donde;  $\dot{m}_{transición}$ : flujo de transición,  $\rho$  : densidad del aire,  $V_2$ : velocidad, A: área de transición.

### Velocidad del ventilador

La velocidad inicial es calculada empleando la ecuación de flujo másico de entrada. Considerando la ecuación de continuidad de los fluidos incomprensibles, podemos decir que el flujo másico final es el mismo que el inicial, lo que hace, que se pueda obtener la velocidad inicial. (Ecuación 7)

$$V_i = \frac{m_{e-salida}}{\rho_{aire} * A_T} \quad (7)$$

Donde;  $V_i$ : velocidad inicial del ventilador,  $m_e$ : flujo de aire de entrada,  $A_T$ : área transversal del ducto a la entrada del ventilador,  $\rho$  : densidad del aire.

### Malla de la bandeja del secador

Se diseña la bandeja donde se colocará el producto considerando el diámetro de la malla perforada, que ayudará a mejorar el flujo y la transferencia de calor que existe entre el producto y el medio dentro del secador, permitiendo disminuir el tiempo de secado y mantener una distribución del aire caliente en la muestra. Para determinar del tamaño de la malla, se toma como referencia el tamaño de un pedazo de banano con diámetro 3 cm, que al pasar por el proceso de secado perderá alrededor del 30% de su peso. Por lo tanto, el diámetro de la banana después del secado será de 9 mm. Con esta condición, la malla que se vaya a seleccionar no debe tener una apertura mayor a 9 mm. La malla seleccionada para ese caso es de 5 mm.

### Número de agujeros de la placa del lecho fluidizado

El aire debe ser laminar, permitiendo que el producto pueda elevarse de manera continua, lo cual se ha instalado una placa agujereada en el sistema de ducto de salida del aire a la cámara. El aire experimentara su transición de turbulento a laminar por medio de estos ductos obligando al flujo a seguir una misma dirección

Las fórmulas para la configuración de los orificios son las siguientes (Ecuación 8 y 9)

$$X = 2A + (D_{agujero} * n) + (n - 1)(x_{espaciado}) \quad (8)$$

$$Y = 2A + (D_{agujero} * m) + (m - 1)(x_{espaciado}) \quad (9)$$

X: largo de la placa agujereada, Y: alto de la placa, A: espaciado de externos, D: diámetro del agujero, x: espaciado entre orificios horizontales / verticales, n: número de orificios horizontales, m: número de orificios verticales.

### Selección del motor

Para la selección del motor que va conectado al ventilador, se consideró los parámetros de potencia y velocidad de rotación, ecuación 10.

$$P = T * \omega \quad (10)$$

Dónde: P: potencia nominal del motor, T: Torque generado por el motor,  $\omega$ : velocidad angular del motor.

### C. Simulación

Antes de la construir se realiza la simulación del equipo utilizando modelos de simulación CFD a través del software SolidWorks. El software posee una gran variedad de herramientas para el modelado, simulación y render. Se utiliza

especialmente la sección de Flow Simulation que permite al usuario simular de manera sencilla flujos de líquido y gas.

En la tabla III, se presentan los parámetros iniciales de la simulación.

TABLA III  
CONDICIONES INICIALES INGRESADAS EN EL SIMULADOR

Gravedad	9,8	$\frac{m}{s^2}$
Presión	101325	Pa
Mallado	Nx=20	
	Ny=27	
	Nz=4	
	Channels:3	
Velocidad de entrada	v=40 v=28 v=18	m/s
Presión de entrada	P=101325	Pa
Temperatura de entrada	T=24	°C

#### D. Uso de materiales reutilizables para la construcción

Socializado el diseño al cliente (Laboratorio de Alimentos de ESPOL) y, además, definidas las partes del secador se procede a la selección de los materiales metálicos de acero inoxidable que puedan reutilizarse para construir el cuerpo del secador, con la finalidad de abaratar los costos de construcción del equipo. Al ser el primer prototipo se realizará pruebas de funcionalidad del secador en pequeña escala, conociendo que estos tipos de equipos se construyen de gran tamaño para industrias. En la tabla IV se presentan las partes del secador.

TABLA IV  
PARTES DEL SECADOR

Partes		Estado
Cono de extracción		Nuevo material
Cámara de secado		Material reutilizable
Placas agujereadas para bandejas y parte de conector de transición		Material reutilizable

Sección de transición conectada entre el ventilador y la cámara de secado		Nuevo material
Resistencia		Nuevo material
	Tablero eléctrico y de control de temperatura y velocidad	Nuevo material
Ventilador	Equipo con mantenimiento para ser reutilizable	
Motor		
Aislante		Pedazos de residuos, donado por una empresa que analiza aislamientos

#### E. Experimentación

Se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo utilizando banano (1 prueba) y pepas de cacao (4 pruebas) a temperaturas de 50 °C con velocidad de aire de 11 m/s, y temperatura de entre 60 a 70°C con velocidades de 5 m/s. Se mide utilizando termopares y flujómetro de tubo. Se ingresaron las muestras en la bandeja dejando secar las muestras por varias horas hasta que alcance la humedad final recomendada en la bibliografía. En el caso del banano al 8%, para el cacao entre 7 al 10% de humedad.

### III. RESULTADOS

#### A. Parámetros de Diseño del secador

El modelo geométrico del secador se determina a partir de los parámetros de; cantidad de producto, flujo, temperatura tipo de materiales y además de los resultados de simulación del prototipo, Permitieron cotejar que las dimensiones de la cámara es la adecuada para el laboratorio y su practicidad.

Las dimensiones de la cámara son las siguientes; altura: 404mm, ancho: 147mm, largo: 650mm.

### Velocidad terminal teórica

El análisis del comportamiento del movimiento fluidodinámico de la partícula permite estimar la velocidad terminal que en condiciones ideales la partícula flotaría, es importante mencionar que la velocidad terminal estará en función de la temperatura por el cambio de la densidad que es el medio en donde se mueve la partícula.

En la figura 3, se muestra la relación de velocidad y pérdida porcentual de la masa, que presenta un comportamiento lineal decreciente para las tres condiciones de temperatura de operación (50°C, 60°C y 70°C). Este análisis nos permite identificar la necesidad de controlar la velocidad de ingreso de aire, considerando que el proceso de deshidratación genera una variación de peso en la partícula en función del tiempo.

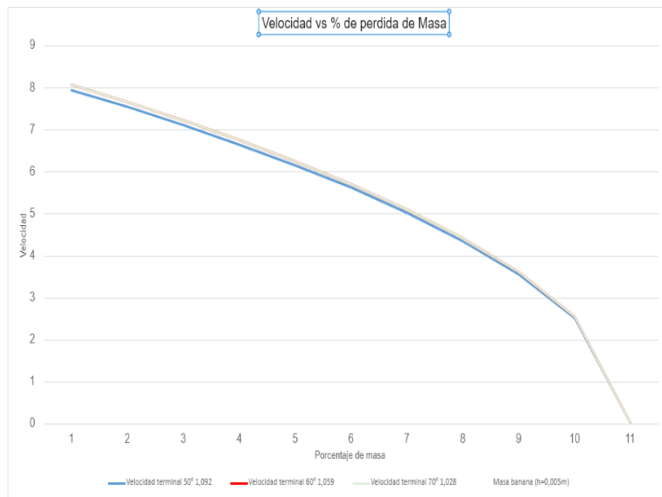


Fig. 3 Velocidad terminal en relación con la pérdida porcentual de la masa.

En la figura 4, se muestra la estimación de la velocidad terminal considerando solamente la pérdida del 90% de su masa inicial y espesor de corte del producto. El cálculo permite determinar el valor de la velocidad teórica que deberá generarse en la cámara de secado para que empiece a flotar a diferentes temperaturas de operación.

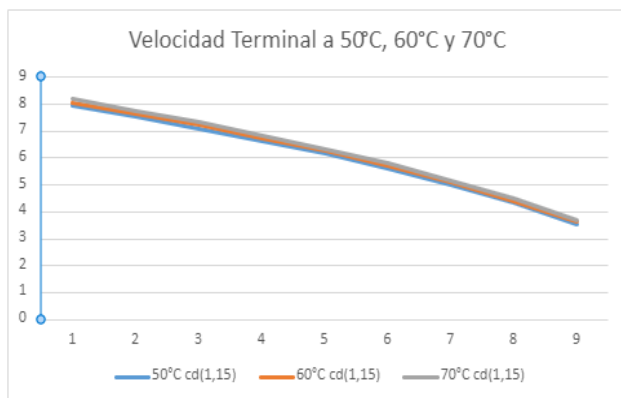


Fig. 4 Velocidad terminal con relación al porcentaje de pérdida de masa en un 90% y espesor del producto de 1 cm.

La gráfica muestra el comportamiento lineal decreciente se mantiene a diferentes espesores de la partícula. Es importante señalar, que con respecto a las tres temperaturas se ha usado un Cd (coeficiente de arrastre) de 1,15 para el caso del banano (selección del producto con mayor contenido de humedad).

En la tabla V, se presenta una compilación de los resultados teóricos de la velocidad de la cámara y de la transición rectangular, calculadas a diferentes temperaturas de operación.

TABLA V.  
FLUJO MÁSSICO TEÓRICO

Temperatura °C	Densidad del aire $\frac{kg}{m^3}$	Flujo másico en recámara de secado (kg/s)			Flujo másico en la transición Kg/s
		Promedio	Máximo	Mínimo	
50°	1,092	0,130	0,173	0,077	0,586
60°	1,059	0,128	0,170	0,076	0,769
70°	1,028	0,127	0,168	0,075	0,295

### Malla con agujeros

A partir del análisis teórico y simulado el número total de orificios no presenta fluctuaciones significantes. El modelaje permitió identificar los diámetros de los orificios y analizar el comportamiento que el fluido se comporte de forma laminar; el diámetro de 8mm fue el único que permitió que el flujo cumpla la condición de régimen laminar, con una placa de 396 orificios.

El arreglo geométrico considerado fue de 36 en horizontal y 11 en vertical, con un diámetro de orificio de 8mm y 6mm de espesor. En la figura 5, se presenta las dimensiones de la placa agujereada.

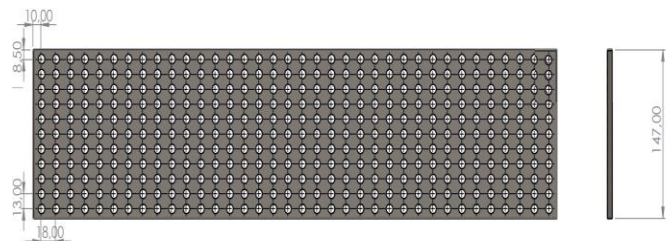


Fig. 5 Dimensiones de la placa.

Las mallas son ingresadas en una bandeja que permite con facilidad el cambio de varias mallas. Las dimensiones de la bandeja son las siguientes:

- ✓ Largo: 500 mm
- ✓ Altura de la bandeja: 80 mm
- ✓ Ancho interno: 120 mm
- ✓ Ancho externo: 140 mm
- ✓ Área de la bandeja: 60000 mm<sup>2</sup>

### Velocidad del ventilador

Como se refirió en la sección de metodología, la velocidad inicial teórica se denomina a la velocidad del ventilador requerida para que pueda trabajar el secador a las condiciones

establecidas por el operador. En la tabla VI se presenta los resultados teóricos calculados para diferente temperatura de operación.

TABLA VI  
ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD INICIAL DEL VENTILADOR

Temperatura °C	Densidad de aire kg/m <sup>3</sup>	Velocidad Inicial		
		Promedio	Máximo	Mínimo
50°	1,092	9,428	12,499	5,589
60°	1,059	9,285	12,309	5,505
70°	1,028	9,147	12,127	5,423

A partir de las velocidades señaladas en la tabla VI se determina la capacidad en CFM que debe alcanzar el ventilador, dichos resultados se muestran en la tabla VII.

$$\text{CFM} = \text{velocidad de aire (ft/min)} * \text{Área del ducto (ft}^2\text{)}$$

TABLA VII  
CFM DEL VENTILADOR

Temperatura (°C)	Velocidad inicial (m/s)	CFM (ft <sup>3</sup> /min)
50°	9,428	7,166
60°	9,285	7,057
70°	9,148	6,953

A partir de los CFM del ventilador se selecciona el motor. Siendo un motor eléctrico WEG trifásico de 3/4 Hp, velocidad de 1800 RPM, 60 Hz con un voltaje variable de 110-220 V. El torque generado por el motor es de 1.0169 Nm, diámetro del eje 19mm, consumo del motor 2,55 amperios.

Finalmente, la resistencia seleccionada es tubular aletada inoxidable tipo “M” 2000W, con un voltaje de 220V -380V, de acero inoxidable.

### B. Simulación

Utilizando el software SolidWorks versión de prueba se procede al modelaje del comportamiento fluidodinámico y térmico del secador de lecho fluidizado. Los resultados obtenidos serán utilizados para validar cualitativamente la geometría y la velocidad de ingreso de aire a la cámara de secado.

Es importante citar que se realizaron varios modelos considerando la temperatura de operación, velocidad de entrada y ubicación de la bandeja de secado. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones colocando los goal points o puntos de análisis a lo largo de la estructura, para obtener datos puntuales de entrada de la velocidad del aire.

Los puntos se encuentran colocados de la siguiente manera (figura 6):

- ✓ Los puntos 1,2,3: analizan el fluido de salida de la placa perforada.
- ✓ Los puntos 4,5,6: analizan el comportamiento en la zona de la bandeja donde se colocará el producto.
- ✓ Los puntos 7, 8, 9 analizan el comportamiento en la zona de transición.

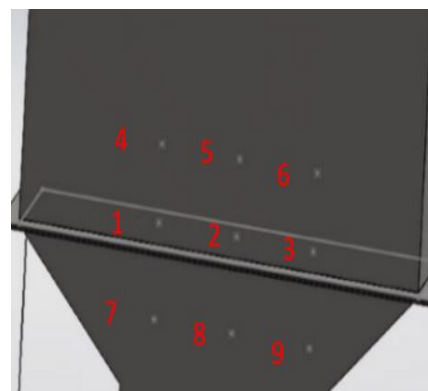


Fig. 6 Puntos de análisis considerados para la simulación del secador (velocidad, temperatura).

En la figura 7, se visualiza el modelo que presenta las líneas de flujo paralelas con un comportamiento aproximado al régimen laminar. Además, el modelo propuesto presenta una distribución de calor bastante homogénea.

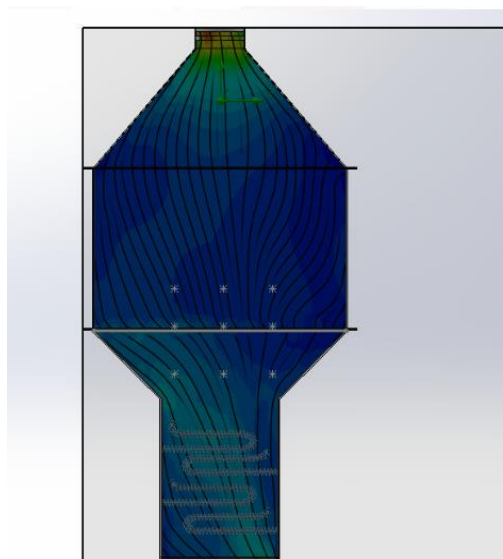


Fig. 7 Simulación de la dirección de velocidad del aire dentro de la cámara.

Los valores de magnitud de velocidad en los puntos 4, 5 y 6 deberán ser mayor a la velocidad terminal estimada para la partícula. En este sentido, si se observa este criterio se podrá asumir que la cámara de secado tiene la velocidad mínima para que flote la partícula.

En la figura 8, se presenta los resultados de la simulación en relación con la distribución de la temperatura en la cámara de secado. Como se puede observar en dicha figura se alcanza la temperatura de operación de la cámara a los 50°C, durante las 2 horas de simulación que se analizó. Es importante indicar que la simulación se realizó al vacío en estado estable.

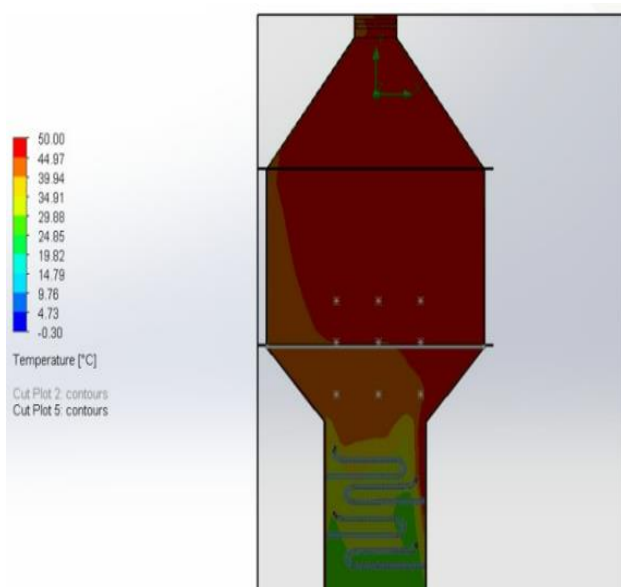


Fig. 8 Simulación de la temperatura de operación de la cámara de secado a un tiempo establecido para 2 horas de simulación.

### C. Pruebas de funcionalidad del equipo

Se realizaron pruebas de funcionamiento del prototipo con la finalidad de ir realizando las modificaciones del secador, a partir de lo que denominamos “método de prueba y error”, con la finalidad de obtener un equipo operativo y funcional.

Entre las principales modificaciones realizadas están:

- ✓ Tener un conjunto de mallas, se debe de realizar el cambio malla con agujeros grandes dependiendo de la cantidad y tipo de producto, con la finalidad que el flujo sea laminar y no turbulento.
- ✓ Eliminación de espacios vacíos entre la bandeja y los laterales del secador. Al dejar espacios entre ambos el aire caliente tiende a fluir por estas salientes a velocidades grandes por lo tanto no es eficiente la distribución del fluido en la sección donde se coloca el producto.
- ✓ Uso de resistencias aletadas y colocadas en forma de acumulador. Utilizar resistencias tipo serpentín u ondular no ayuda en la distribución de flujo, por lo tanto, en estos tipos de diseño es mejor utilizar resistencias aletadas, además la posición entre resistencias es importante con la finalidad que el aire circule por toda la resistencia y no solo por una sección.

A continuación, se presentan los resultados más prometedores obtenidos a partir del secado de pepas de cacao, los resultados fueron comparados con un secador eléctrico de bandeja con una carga de 800 gramos.

TABLA VIII  
COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO Y EL SECADOR DE BANDEJA ELÉCTRICO

Parámetros	Secador de lecho fluidizado	Secador eléctrico de bandeja
------------	-----------------------------	------------------------------

Muestra	Cacao al 39.9% de humedad	Cacao al 34.85 % de humedad
Temperatura de operación	50 °C	49 °C a 50°C
Velocidad de secado	11 m/s	2 m/s
Consumo de energía	1.7 kW/h	1 kW/h
Tiempo de secado	8 horas	18 horas
Humedad final del producto	6.86	6.43

Durante el análisis se determinó que, a temperatura de 50 °C, la velocidad debe ser menor a la utilizadas en las pruebas > 11m/s, recomendándose entre 5 a 6 m/s. En cambio, a temperaturas entre 70°C a 80°C la velocidad de viento de 9 a 11m/s es la adecuada. En estos tipos de secadores la elevación del producto garantiza un secado homogéneo y rápido del producto alimenticio, pero esto no sucede con la pepa de cacao, solo se produce un ligero movimiento del grano, tardando 8 a 9 horas de secado. En el caso de las rodajas finas de plátano y manzana, el producto se elevaba a partir de las 2 horas, permitiendo que en 4 horas el producto se encuentre seco.

En la figura 9, se presenta a manera de ejemplo el proceso de mediciones utilizando un termopar/ termocupla dentro de la cámara y registro de velocidad de viento en el controlador



Fig.9 Medición de temperatura y velocidad de viento para una muestra de cacao.

### C. Costo del equipo

Realizando un análisis de costo del secador partiendo del análisis de materiales nuevos, mano de obra, aislante, ventilador, uso de herramientas, repuestos, accesorios, costo del soldador alrededor de \$3200 dólares americano. Para este caso de reutilizar materiales el precio se reduce al 40 %. En la figura 10 se presenta el equipo terminado.





Fig. 10 Secador de lecho fluidizado - partes internas del equipo.

#### IV. CONCLUSIONES

Realizando la estimación de velocidad terminal en función de la variación del peso del producto, al determinar un análisis del comportamiento de los datos se concluye que la magnitud de la velocidad decrece en función de la pérdida de humedad de la muestra en diferentes temperaturas de trabajo. Por lo tanto, es importante controlar la velocidad de ingreso de aire a la cámara de secado en diferentes etapas del proceso del secador de lecho fluidizado

La complejidad del diseño para estos secadores se da implícitamente en tratar de mantener un flujo laminar dentro de la cámara con la finalidad que toda la muestra del producto alimentario llegue el aire caliente, por esta razón la selección de la malla o rejilla es importante.

A partir de los resultados establecidos por varios autores el método de lecho fluidizado permite una mayor transferencia de masa y calor en el producto reduciendo el tiempo de secado de las muestras entre 6 a 7 horas menos que utilizando una estufa convencional [7] [6]. Por lo tanto, estos tipos de secadores permiten deshidratar un producto en poco tiempo alcanzando la misma calidad organolépticas de producto final.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) de la facultad de Ingeniería mecánica y Ciencias de la producción (FIMCP) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral -ESPOL y a la Red de eficiencia térmica Industrial (RIETI) perteneciente al CYTED.

#### REFERENCIAS

[1] Pedro Fito, Introducción al secado de alimentos por aire caliente, vol. Primero, Valencia : UPV, 2001, pp. 12-50.  
 [2] E. Delgado-Plaza, "Thermal Evaluation of a Hybrid Dryer with Solar and Geothermal Energy for

Agroindustry Application," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 19, p. 4079, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9194079>  
 [3] E. Delgado-Plaza, "Diseño, modelo matemático y construcción de un secadero optimizado con energías limpias," *Univerisdda*, 13 02 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10347/12299>. [Accessed 2023].  
 [4] Á. Díaz, "core.ac.uk," 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/44310631.pdf>. [Accessed 2023].  
 [5] E. Castañeda., "Diseño y Prototipo del Tubo de Venturi para la Solución de Problemas Físicos," Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, 2020.  
 [6] E. Narváez, "Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización e implmentación del control de flujo y temperatura," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2012.  
 [7] R. Urrutia, "Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para biomasa forestal," Univeridad Austral de Chile, Valdivia-Chile, 2006.  
 [8] J. Castro, "INNOVATIVE PROTOTYPE EVALUATION METHODOLOGY,," Erasmus Program, 2019.  
 [9] W. Zhu, "Engineering Design and Manufacturing Education through Research Experience for High School Teachers," pp. 1340-1348, 2018.  
 [10] K. ARIAS, "Study of relevant activities in product design. Model VDI 2221 versus the methodological model I+P+D3," *ESPACIOS*, vol. 39, no. 9, p. 22, 2018.  
 [11] I. Baez, "Product Design Methodology under the Structure of Innovation and Creativity. Review study," *Espacios*, vol. 39, no. 11, p. 20, 2018.  
 [12] B. Bjerke, "Being smart about writing SMART objectives," *Evaluation and Program Planning*, vol. 61, pp. 25-127, 2017.  
 [13] E. Arce, "Design Sprint: enhancing STEAM and engineering education through agile prototyping and testing ideas," *Thinking Skills and Creativity*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101039>  
 [14] Y. Deng, "High-performance, safe and reliable soft-metal thermal pad for thermal management of electronics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 199, p. 117555, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117555>  
 [15] J J. Castro, INNOVATIVE PROTOTYPE EVALUATION METHODOLOGY, Erasmus Program, 2019.  
 [16] Enrique Castañeda, "Diseño y Prototipo del Tubo de Venturi para la Solución de Problemas Físicos de," Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos., 2020.