

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA  
UNPHU  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE QUÍMICA



“Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”

Trabajo de grado

Presentado por

Keidy María García Valdez

Yugeudy Tamar Mercedes Vanterpool

Para optar por el grado de

Ingeniero Químico

Santo Domingo, D. N.

2020

## **AGRADECIMIENTOS**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser la guía de mi vida y mis proyectos, por ayudarme a alcanzar mis metas, a mejorar cada día y a crecer.

A mis padres Keila Valdez y Luis García, por su apoyo y guía incondicional en cada momento, recursos y amor para que esto sea posible.

A mis hermanos, Abel García e Isael García por ser parte de mi motivación a realizar este proyecto.

A Enmanuel Martínez, por el apoyo incondicional en la mano de obra necesaria y el apoyo moral para la realización de este proyecto.

A Ysidro García Mota, por el trabajo técnico realizado para hacer posible este proyecto.

A Ing. Doris Peña, por ser nuestra educadora, aliada y mentora durante todo el proceso de formación profesional.

A Ing. Ramón Pérez, por su colaboración y guía para la realización de este proyecto.

A mi compañera Yugeudy Mercedes, por su contribución en la realización de este trabajo.

Gracias especiales a mi padre Ing. Luis García, por brindar todos sus conocimientos técnicos y su experiencia para lograr que esto sea posible.

Keidy María García Valdez

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, en primer lugar, por su inmenso e inmerecido amor hacia mí, porque me ha llenado de su gracia y me ha permitido cumplir esta gran meta en mi vida.

A mis padres, Santiago Mercedes y Elena Vanterpool a quienes amo con todo mi corazón, gracias por su apoyo, amor incondicional, dedicación y todos los sacrificios hechos para mí y mis hermanos.

A la Fundación Brugal, por confiar en mí y darme la oportunidad de alcanzar esta meta.

A mis familiares y hermanos en cristo, que me apoyaron con sus oraciones en todo momento.

A mis compañeras de estudio, que hoy en día son mis amigas del alma; Noemí de Jesús, Caroline Jaime, Sarah Peña e Indhira Díaz. Gracias por su amistad.

A mi compañera Keidy García y su padre el Ing. Luis García, por su contribución en la realización de este trabajo de grado.

A nuestra directora Ing. Doris Peña, por siempre orientarnos en la transición de estudiantes a profesionales.

A nuestro asesor Ing. Ramón Pérez, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo de grado.

Yugeudy Tamar Mercedes Vanterpool

## **DEDICATORIAS**

## **DEDICATORIAS**

A Dios, centro de mi vida, dueño de la ciencia, sabiduría y la inteligencia.

A toda persona que tenga sed de saber y crecer, tenga algo para enseñar, algo para aprender y algo para mejorar.

Keidy María García Valdez

VI

## **DEDICATORIAS**

A Dios, quien es el centro de mi vida, a quien le entrego todos mis planes y proyectos y me da las fuerzas para seguir hacia delante.

A mis padres, quienes son mi inspiración y motivo principal de ser mejor cada día.

Yugeudy Tamar Mercedes Vanterpool

VII

## **ÍNDICE**

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIAS .....	V
ÍNDICE .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
OBJETIVOS.....	18
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos .....	19
JUSTIFICACIÓN .....	20
PRIMERA PARTE MARCO TEÓRICO.....	23
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	24
I.1. Antecedentes histórico del proceso de fluidización .....	24
I.2. Antecedentes directos del secado por medio de la fluidización .....	26
I.2.1. Secado de alimentos en granos en República Dominicana .....	27
I.2.2. Estudios precedentes del secado .....	28
CAPÍTULO II SECADO Y FLUIDIZACIÓN .....	29
II.1. Secado de alimentos.....	29
II.2. Métodos de secado.....	30
II.3. Elementos que contribuyen en el proceso de secado .....	31
II.3.1. Aire.....	31

II.3.2. Temperatura.....	31
II.3.3. Agua.....	32
II.3.3.1. Tipos de agua en los alimentos.....	32
II.3.3.2. Contenido de humedad.....	33
II.3.3.3. Contenido de humedad en alimentos en granos.....	34
II.4. Curvas de secado.....	35
II.4.1. Descripción de las curvas de secado.....	37
II.5. Clasificación de secadores.....	38
II.5.1. Secadores adiabáticos y movimiento de los sólidos en su interior.....	39
II.5.2. Transferencia de calor y masa en secadores adiabáticos.....	41
II.6. Fundamentos de secado en lechos fluidizados.....	43
II.6.1. Fenómenos de la fluidización.....	44
II.6.2. Clasificación de las partículas a fluidizar.....	47
II.7. Variables importantes en un lecho fluidizado.....	49
II.7.1. Diámetro de las partículas esféricas.....	49
II.7.2. Esfericidad de las partículas.....	50
II.7.3. Porosidad de las partículas.....	50
II.8. Parámetros del lecho fluidizado.....	51
II.8.1. Velocidad mínima de fluidización en el lecho.....	51
II.8.2. Velocidad de operación en el lecho.....	52
II.8.3. Caída de presión en el lecho.....	52
II.9. Ventajas de un secador de lecho fluidizado.....	53

SEGUNDA PARTE MARCO METODOLÓGICO .....	54
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	55
III.1. Tipo de investigación.....	55
CAPÍTULO IV ASPECTOS PRÁCTICOS .....	56
IV.1. Características de la alimentación .....	56
IV.1.1. Diámetro de los granos .....	57
IV.1.2. Esfericidad de las partículas.....	57
IV.1.3. Porosidad de las partículas.....	57
IV.1.4. Velocidad mínima de fluidización en el lecho .....	58
IV.1.5. Velocidad de operación en el lecho .....	58
IV.1.6. Caída de presión en el lecho .....	58
IV.2. Secador de lecho fluidizado .....	59
IV.2.1. Sistema de suministro de aire.....	59
IV.2.2. Sistema de calentamiento de aire .....	59
IV.2.3. Lecho de fluidización .....	60
IV.2.4. Sistema de medición de temperatura.....	60
CAPÍTULO V CÁLCULOS Y DISEÑO DEL EQUIPO .....	61
V.1. Características de la alimentación .....	61
V.1.1. Velocidad mínima de fluidización en el lecho .....	62
V.1.2. Velocidad de operación en el lecho .....	62
V.1.3. Caída de presión en el lecho.....	62
V.2. Secador de lecho fluidizado .....	63

V.2.1. Sistema de suministro de aire .....	63
V.2.2. Sistema de calentamiento de aire.....	69
V.2.3. Lecho de fluidización .....	71
V.2.4. Sistema de medición de temperatura y tiempo de operación .....	72
CAPÍTULO VI VALORACIÓN DEL SECADO .....	74
VI.1. Determinación del contenido de humedad.....	74
VI.2. Obtención de las curvas de secado.....	74
TERCERA PARTE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	75
CAPÍTULO VII DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	76
VII.1. Sistema de suministro de aire .....	76
VII.2. Sistema de calentamiento de aire.....	76
VII.3. Lecho de fluidización .....	77
VII.4. Sistema de medición de temperatura y tiempo de operación .....	77
CAPÍTULO VIII RESULTADOS VALORACIÓN DEL SECADO .....	79
VIII.1. Determinación del contenido de humedad .....	79
VIII.2. Curva de peso en el prototipo de secador de lecho fluidizado .....	80
VIII.3. Curva de humedad en el prototipo de secador de lecho fluidizado .....	81
VIII.4. Curva de velocidad de secado en el prototipo de secador de lecho fluidizado ....	82
VIII.4.1. Tiempo de secado .....	83
CAPÍTULO IX ANÁLISIS VALORACIÓN DEL SECADO .....	84
IX.1. Determinación del contenido de humedad.....	84
IX.2. Curva de peso en el prototipo de secador de lecho fluidizado.....	84

IX.3. Curva de humedad en el prototipo de secador de lecho fluidizado.....	84
IX.4. Curva de velocidad de secado en el prototipo de secador de lecho fluidizado .....	84
IX.4.1. Tiempo de secado .....	85
CUARTA PARTE CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES .....	86
CONCLUSIÓN.....	87
RECOMENDACIONES .....	90
QUINTA PARTE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92
LIBROS .....	93
TRABAJOS DE GRADO.....	95
ARTÍCULOS Y PUBLICACIONES .....	97
PAGINAS WED .....	99
SEXTA PARTE ANEXOS.....	100
ANEXO I SIMBOLOS.....	101
ANEXO II TABLAS.....	105
ANEXO III GRÁFICAS ELÉCTRICAS .....	110
ANEXO IV PRESUPUESTOS.....	114
ANEXO V IMÁGENES.....	117
ANEXOS VI PLANOS Y DIAGRAMAS DEL EQUIPO.....	122
ANEXO VII CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	127
ANEXO VIII MANUAL DE PRÁCTICAS .....	133

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1: Curva de secado.....	35
Figura II.2: Curva de Velocidad de secado.....	36
Figura II.3: Modelos de interacción gas-sólido en los secadores.....	40
Figura II.4: Fenómenos: a) lecho fijo, b) lecho en comienzo de fluidización.....	44
Figura II.5: Fluidización burbujeante.....	45
Figura II.6: Fluidización slugging: (a) con slugs axiales (b) con slugs de pared.....	46
Figura II.7: Fluidización: (a) turbulenta, (b) en fase dispersa.....	47
Figura II.8: Clasificación de las partículas según Geldart.....	48
Figura VII.1: Prototipo de secador de lecho fluidizado.....	78
Figura VIII.1: Curva de pérdida de pesos en el secador.....	80
Figura VIII.2: Curva de pérdida de humedad en el secador.....	81
Figura VIII.3: Curva de velocidad de secado en el secador.....	82

## **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

El secado es una operación unitaria de separación, que consiste en eliminar agua o algún compuesto volátil de un sólido por medios térmicos. Es un medio de conservación de los alimentos, donde el agua retirada durante este proceso puede ser eliminada por simples condiciones ambientales, o por procesos controlados en los que se someten a técnicas que emplean diferentes medios para evaporar el agua.

A nivel industrial el secado se lleva a cabo mediante una gran variedad de tipos de secadores, entre los cuales podemos encontrar el secador de lecho fluidizado, donde el sólido a secar está en forma de partículas en estado de suspensión. La técnica de secado con aire caliente por medio de la fluidización se utiliza para alimentos en granos, minerales molidos, arena, polímeros, fertilizantes, fármacos, materiales cristalinos, entre otros.

El secado en lechos fluidos se caracteriza por una alta tasa de transferencia de humedad y calor, además de poseer una excelente capacidad de control térmico en comparación con el proceso de secado convencional. Una de las limitantes en el secado por fluidización es la elección de materiales fluidizables, debido a que algunos materiales tienden a aglomerarse o simplemente no fluidizan y se deben implementar mecanismos de vibración.

En el presente trabajo de grado se estudia el secado por fluidización, haciéndose necesario entender cuáles son los principios de este fenómeno, las propiedades de la materia a secar y las herramientas utilizadas para determinar la valoración del secado.

El objetivo principal de este trabajo de grado es diseñar, construir y poner en marcha un prototipo de secador de lecho fluidizado a partir de piezas reutilizadas, para ser utilizado en los laboratorios de operaciones unitarias, con el fin de realizar prácticas de secado por medio de la fluidización. Para conocer el desempeño del equipo, se realizan operaciones de secado, y se construyen curvas que brindan información sobre el tiempo y la velocidad de secado de una muestra de maíz.

La estructura del trabajo la conforman seis partes, divididas en capítulos, en la primera parte que abarca los capítulos I y II, se recogen los antecedentes, los conceptos más importantes del método de secado y desarrollo de la fluidización. La segunda parte conformada por los capítulos III, IV, V y VI describen las metodologías utilizadas para el diseño, construcción y valoración del secado en el equipo, la tercera parte; capítulo VII, VIII y IX detalla los resultados obtenidos de la construcción y desempeño del prototipo de secador, la cuarta parte trata las conclusiones y recomendaciones, la quinta y sexta parte recogen las referencias y anexos respectivamente.

## **OBJETIVOS**

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, construir y poner en marcha un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar un prototipo de secador de lecho fluidizado para alimentos en grano a partir de piezas reutilizadas.
2. Construir el prototipo del secador de lecho fluidizado con un tamaño manejable y desarmable.
3. Poner en marcha el prototipo de secador para determinar el desempeño, basado en la construcción de curvas de secado.
4. Determinar la eficiencia del prototipo de secador de lecho fluidizado.

**JUSTIFICACIÓN**

## JUSTIFICACIÓN

La conservación de algunos alimentos en granos o productos agrícolas como maíz, trigo y arroz, representa un gran problema en la industria alimentaria, ya que si no se utiliza un método que disminuya el grado de humedad de dichos granos, después de su cosecha, estos pueden ser afectados por hongos y llegar al estado de descomposición.

El objetivo general del secado de granos consiste, en reducir su humedad hasta un nivel adecuado para su almacenaje y proceso, lo que permite mantener intactas sus propiedades alimenticias y su estructura física. A nivel industrial este proceso también se aplica para reducir el peso y volumen del alimento, lo cual minimiza los costos de empaque, almacenamiento y transporte.

La utilización de secadores de lecho fluidizado es la técnica con mayor aceptación para el secado de los alimentos en granos, debido a la gran cantidad de transferencia de calor y masa que ofrece con respecto a otros secadores de contacto directo.

A pesar de su gran aceptación, en la República Dominicana esta técnica aún no se domina ni se utiliza lo suficiente, debido a que diversos sectores agrícolas, especialmente los productores de cacao y café, que son los productos más comercializados a nivel internacional, utilizan el método de secado natural, por su bajo costo de operación y recursos energéticos.

Debido a la poca investigación que se encuentran en base a este tema, se desea ampliar el campo de investigación del secado artificial por medio de secadores de lecho fluidizado en los diversos productos agrícolas del país, lo cual representa una oportunidad de mejora y aplicación.

Conociendo el uso que se le puede dar a este equipo, se quiere construir un prototipo de secador de lecho fluidizado, para ver de cerca el proceso de secado por medio de la fluidización, el cual permite ver la aplicación de la teoría con la práctica y aplicar todos estos conocimientos en el ámbito laboral al que en un futuro insertaremos como ingenieros químicos, además de satisfacer la necesidad de este equipo en el laboratorio de operaciones unitarias.

**PRIMERA PARTE**

**MARCO TEÓRICO**

## CAPÍTULO I ANTECEDENTES

El secado por medio de la fluidización es un proceso relativamente nuevo, para tener una mejor idea de cómo inicia y como se encuentra actualmente, es necesario distinguir sus antecedentes en dos grupos. En el primero, se presentan algunos datos que son relevantes en cuanto al desarrollo y avance del proceso de fluidización a lo largo de la historia, y en el segundo se muestran aquellos trabajos recientes o inmediatos que se encuentran y que guardan relación con este trabajo de grado.

### **I.1. Antecedentes histórico del proceso de fluidización**

A principios de la década de 1900, la Standard Oil Company, la empresa petrolera más grande del mundo, utiliza la destilación a temperatura y el craqueo térmico para refinar el petróleo crudo en diferentes productos. Desde ese entonces inician las investigaciones en torno a mejorar el craqueo de productos para obtener moléculas más pequeñas de los productos petroleros más importantes de esa época, en el 1921, se desarrolla una mejor unidad de craqueo, mientras que en Europa se trabaja con nuevas tecnologías para la conversión de carbón en petróleo.

En 1936, el investigador francés Eugene Houdry desarrolla el proceso de Houdry, que consiste mediante catálisis en un lecho fijo romper las moléculas de petróleo, con este proceso se logra en la primera guerra mundial obtener gasolina con mayor octanaje, pero a pesar del gran aporte que resulta ser para la guerra, los costes del proceso son demasiado altos por lo que los investigadores continúan abundando del tema.

En 1938, la compañía Exxon Research se interesa en mejorar este proceso e incluye el concepto de lecho móvil, al que llaman fluidización, ya que este posee movimiento, y sus propiedades son tratadas con relación a lo fluidos, este proceso genera una serie de beneficios para la producción de gasolina con alto octanaje a menor costo.

El desarrollo comercial de los lechos fluidizados inicia en la década de 1940, con la gasificación del carbón. Esta consiste en la transformación del carbón de sólido a un combustible gaseoso mediante una oxidación parcial, para la cual hay que eliminar sustancias indeseables del carbón tales como cenizas y sulfuros. Una serie de procesos de fluidización relacionados con el petróleo continúan desarrollándose lo cual origina una disminución en los costos de la producción del petróleo.

Con el paso de los años se van desarrollando diversos tipos de lechos fluidizados, pero no es hasta 1946, que aparece una importante investigación realizada por Squires en el ámbito industrial, a quien se le atribuye la creación y desarrollo de los procesos relacionados con lechos fluidos.

La técnica relacionada con los lechos fluidizados para secado también tiene un rápido desarrollo y ha mediado de la década de 1950, se puede establecer la técnica adecuadamente. Luego en los años 60, Davidson explica el movimiento de un fluido alrededor de una burbuja suspendida, abriendo campo a la investigación y comprensión de los lechos fluidizados burbujeantes. En los 70, la fluidización toma un giro completamente al enfocarse al área farmacéutica, que desde entonces se usa para secado rápido. Hoy en día sigue siendo estudiada la fluidización, demostrando que se pueden desarrollar nuevos usos y técnicas de trabajo.

## **1.2. Antecedentes directos del secado por medio de la fluidización**

Uno de los campos de la fluidización es el secado con aire caliente, un proceso atractivo para partículas y materiales granulares. La técnica es usada industrialmente desde 1948, y hoy este proceso disfruta de gran popularidad para productos como: alimentos en granos, arena, polímeros, minerales molidos, materiales cristalinos, fertilizantes, farmacéuticos y muchos otros productos.

Thomas y Varma (1992), realizan un estudio sobre el secado en lecho fluidizado de materiales alimenticios granulares, con el fin de crear modelos matemáticos para su posterior utilización.

También, Srinivasa Kannan (1996), realiza un experimento de secado en lechos fluidizados de diferentes partículas en conjunto, entre ellas: arena, semillas de amapola y mostaza, donde se compara la velocidad de secado contra el contenido de humedad en los sólidos, tomando en consideración la temperatura de operación y la cantidad de flujo de aire y observa que algunas partículas presentan solo la velocidad constante del secado, mientras que otras partículas muestran una considerable disminución de la velocidad del secado. Concluye que es necesario establecer condiciones de operación diferente para cada partícula.

Asimismo, Alnaldos (1998), realiza una serie de experimentos de secado en un lecho fluidizado a vacío con varios tipos de partículas, y observa que el efecto de reducir la presión de operación es mejor en el secado de partículas porosa, cuya conclusión principal es que en un lecho fluidizado operando a presiones reducidas presenta una posibilidad para una mejor calidad de producción, con condiciones de procesos más seguras.

Las investigaciones en el secado siguen cubriendo diversos puntos de vista, Kozanoglu (2003), investiga el efecto de la presión en un lecho fluidizado a vacío, y concluye que al bajar la presión de operación en el proceso de secado se incrementa la velocidad de secado en partículas porosas como silica gel, por otro lado no presenta mejoría con partículas compactas, poca porosas, al bajar la presión.

Otros estudios relacionados con la variación de las condiciones de operación son realizados por Kozanoglu (2002), y Llop (1996), para determinar su efecto e importancia en los diferentes tipos de partículas en el lecho fluidizado.

### **1.2.1. Secado de alimentos en granos en República Dominicana**

La agricultura es una fuente de ingreso importante en la económica de la República Dominicana. Esta actividad se centra en el cultivo de la caña, arroz, cacao, café, maíz, habichuela, ajo, tabaco, cebolla, entre otros, representando el 11% del PIB y cerca del 15% de los empleos, siendo las localidades del noreste y planicie costera del sur donde se encuentran las principales plantaciones comerciales del país (Banco mundial, 2015).

El método de secado que más se utiliza en la República Dominicana para los productos agrícolas especialmente para el cacao y el café, es el secado natural (Carrasco D., 2015). Este método se realiza en los diferentes tipos de secaderos naturales, como son: los carros secaderos con plataforma de madera fija y techos de zinc, secaderos de cemento, y secaderos tipo túnel. Siendo los secadores tipo túnel los de mayor uso y más importantes dentro de las grandes empresas que comercializan el cacao.

El método de secado artificial también se utiliza, pero su manejo y conocimiento aún es mínimo. En el país se introducen algunos modelos brasileños de las industrias Pinhalense (2009), dentro de los cuales los de mayor uso son: los secadores rotatorios SER-100, SR-150, SER-075 y la secadora de cacao y café RI (Secadoras y Procesadoras, 2021). Otro modelo que se utiliza es las Oreadoras CM de la industria Peruana IMSA (Industria Metálica SARA).

En el 2014 la empresa taiwanesa SUNCUE, especialista en ofrecer tecnología para el secado de granos, se establece en República Dominicana y en diciembre 2018 se construye la primera planta de secado para productos agrícolas, en Valle Viejo San Juan de la Maguana, entrando en operación en marzo del 2019.

### **1.2.2. Estudios precedentes del secado**

Un proyecto de Rita Tirado y Ricardo Meléndez. *Diseño y construcción de un secador utilizando la fluidización*. (1991), sirve de apoyo para la realización de este trabajo de grado, donde se diseña y construye un secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias en la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

Una investigación de Ignacio Carrasco Díaz. *Propuesta para el uso de tipos de secado de cacao con su incidencia en la calidad de los granos*. (2015), donde se evalúa la influencia que tiene el secado del cacao en la calidad del grano con énfasis en el secado artificial. La investigación destaca la importancia que tiene el uso de los secaderos artificiales en la calidad del cacao en las empresas del sector, y cómo éste contribuye al desarrollo sostenible de la misma.

## **CAPÍTULO II SECADO Y FLUIDIZACIÓN**

Este capítulo describe el proceso de secado, definiendo su concepto, métodos y los elementos más importantes que intervienen en esta operación unitaria, también se definen los métodos de valoración de secado y la clasificación de los secadores que más se utilizan. Se habla también del fundamento de secado en lechos fluidizados y las ventajas que este tipo de secador ofrece.

### **II.1. Secado de alimentos**

El secado de alimentos es el método de conservación más antiguo usado por el hombre, consiste fundamentalmente en eliminar el agua de los alimentos por medios térmicos, con el fin de disminuir la proliferación de los microorganismos que provocan su descomposición. Este proceso se puede realizar de forma natural el cual radica en la utilización de energía solar, o por medios artificiales, que consisten en el empleo de secadoras mecánicas haciendo pasar una corriente de aire seco y caliente por la masa del alimento hasta alcanzar la humedad deseada.

En el secado se llevan a cabo dos procesos relacionados entre sí, que varían por las propiedades y características externas e internas del alimento a secar, y de ellos dependerá la rapidez con la cual se realice el secado. En el primer proceso hay transferencia de calor de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie, y en el segundo lugar hay transferencia de la humedad interna hacia la superficie del alimento.

## II.2. Métodos de secado

La evaporación y la vaporización son los dos métodos que se utilizan para eliminar la humedad de un alimento.

- **La evaporación:** ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del alimento iguala la presión parcial del gas en el aire. Esto sucede por el aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Pero si el alimento es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre, puede ser disminuida, bajando la presión.
- **La vaporización:** es llevado a cabo por convección, haciendo pasar aire caliente sobre el alimento húmedo. El aire es enfriado por el alimento y la humedad es transferida hacia el aire y en este caso la presión del vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión parcial del gas en el aire.

Ya sea que el secado se efectúe por evaporación o vaporización “La presión de vapor del agua contenida en el sólido es la que determina el intercambio de humedad entre éste y el aire”.

### **II.3. Elementos que contribuyen en el proceso de secado**

En el proceso de secado intervienen diversos elementos relacionados con las características del alimento a secar, siendo los más importantes las propiedades del aire, su temperatura y el contenido de agua en el alimento.

#### **II.3.1. Aire**

Los alimentos pueden ser secados con aire, vapor sobrecalentado, en vacío, con gas inerte y con aplicación directa de calor. Habitualmente se utiliza aire como agente secante por su abundancia en el ambiente, su comodidad y su fácil manejo sobre el calentamiento del alimento (Fellows y col., 1994). El aire caliente produce la transferencia de calor lo que hace posible el secado del alimento, conjuntamente, transporta el aire húmedo a la salida del secador y la velocidad de secado incrementa a medida que aumenta la velocidad de aire que pasa sobre el alimento. (Foust, 1990).

#### **II.3.2. Temperatura**

La temperatura del aire de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado a altas temperaturas e influye significativamente en la eficiencia del secado, en la calidad organoléptica del producto final y está estrechamente relacionada con la humedad relativa del aire. La humedad relativa, es un término que se utiliza para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra (Ress y col., 1991).

### II.3.3. Agua

Uno de los participantes más significativos en las propiedades organolépticas de los alimentos es el agua, la pérdida o ganancia de este contribuyente disminuye su calidad organoléptica y por ende su aceptación.

Se puede extender la vida útil de los alimentos eliminándole agua o haciéndola menos disponibles ya que la presencia de esta sustancia a ciertas cantidades, aumenta el deterioro de los alimentos por acción de los microorganismos y las enzimas (Brennan y col., 1998).

Como se considera la influencia del contenido de agua en la estabilidad de los alimentos, es necesario destacar que no es el contenido total en agua lo substancial, sino la cantidad de agua utilizable en el crecimiento microbiano y la actividad química.

#### II.3.3.1. Tipos de agua en los alimentos

- **Agua ligada:** es la que se encuentra fielmente ligada a puntos específicos de los componentes sólidos (Brennan y col., 1998; Badui, 1993).
- **Agua no ligada:** se encuentra en los huecos de los sólidos conformados por partículas grandes y no porosas (Brennan y col., 1998; Badui, 1993).
- **Agua libre:** es la que se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, es la primera en congelarse y es la única utilizable para el crecimiento de los microorganismos o la que interviene en las transformaciones hidrolíticas, químicas u enzimáticas, por encontrarse en menor cantidad (Brennan y col., 1998; Badui, 1993).

### II.3.3.2. Contenido de humedad

Representa toda el agua que se encuentra en el alimento (Badui, 1993). Esta agua puede expresarse en dos formas:

- **Base húmeda:** se refiere al contenido de agua con relación a la masa total húmeda del sólido y se expresa de acuerdo a la ecuación II.1.

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_o} = \frac{W_o - W_d}{W_o} \quad (\text{Ec.II. 1})$$

- **Base seca:** es el contenido de agua con relación a la masa totalmente seca del sólido y se expresa de acuerdo a la ecuación II.2.

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_o - W_d}{W_d} \quad (\text{Ec.II. 2})$$

**Dónde:**

$M_{wb}$  = Humedad en base húmeda (kg agua/kg prod. húmedo).

$M_{db}$  = Humedad en base seca (kg agua/kg prod. seco)

$W_d$  = Peso de la materia seca en el producto (kg).

$W_o$  = Peso inicial de la materia sin secar (kg).

$W_w$  = Cantidad de agua en el producto húmedo (kg).

En los alimentos, los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de humedad se reduce por debajo del 10% en su peso, sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en su peso, para preservar su sabor y valor nutritivo (Geankoplis 1998).

### **II.3.3.3. Contenido de humedad en alimentos en granos**

Es esencial secar algunos alimentos en granos hasta obtener un contenido de humedad inocuo, porque el nivel de humedad es probablemente el factor más importante que influye en la viabilidad de estos productos durante el almacenamiento.

En general, si el contenido de humedad aumenta, disminuye la duración del almacenamiento. Un alto contenido de humedad puede dar lugar a la formación de moho y por consiguientes pérdidas rápidas, un contenido de humedad muy bajo menor del 4%, puede ocasionar una desecación extrema, y causar daños al grano o endurecimiento (FAO, 2019).

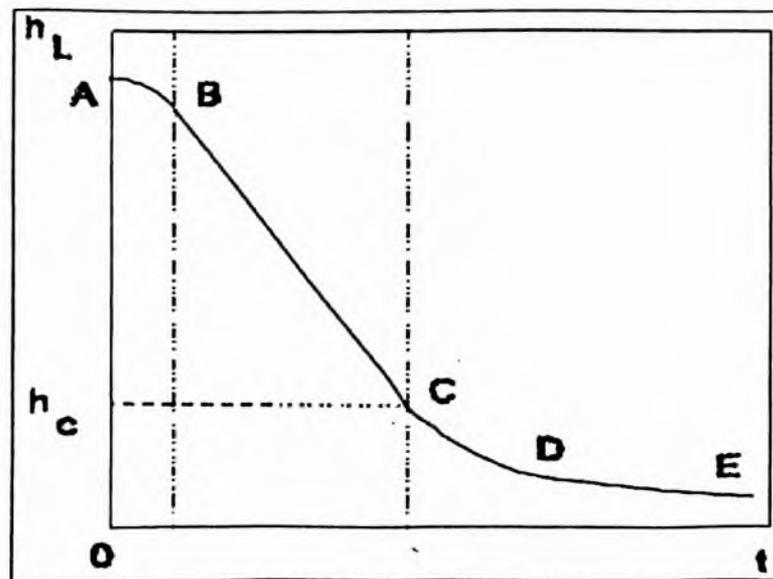
El contenido de humedad en los alimentos en granos o productos agrícolas como el maíz, trigo y arroz, está regulado por la Norma de Inocuidad de los Productos Agrícolas Frescos, bajo la ley de modernización de la inocuidad de los alimentos FSMA por sus siglas en Inglés. Esta norma establece los estándares mínimos de inocuidad de los alimentos basados en la ciencia para el cultivo, cosecha, empaque y almacenamiento de cereales, frutas, vegetales y geminados destinados al consumo humano (PennState Extension, 2018).

## II.4. Curvas de secado

Cada vez que un sólido se seca experimentalmente se recogen datos que relacionan el contenido de humedad con el tiempo. Estos datos se utilizan para construir las curvas de secado, las cuales dan información sobre la velocidad de secado del sólido bajo ciertas condiciones.

En la figura II.1 se representa la curva de secado, en un caso habitual en que los sólidos mojados pierden humedad, en primer lugar por evaporación desde una superficie saturada del sólido, luego viene un período de evaporación de la superficie saturada que tiene un área que gradualmente va disminuyendo, y finalmente cuando el agua del interior del sólido se evapora.

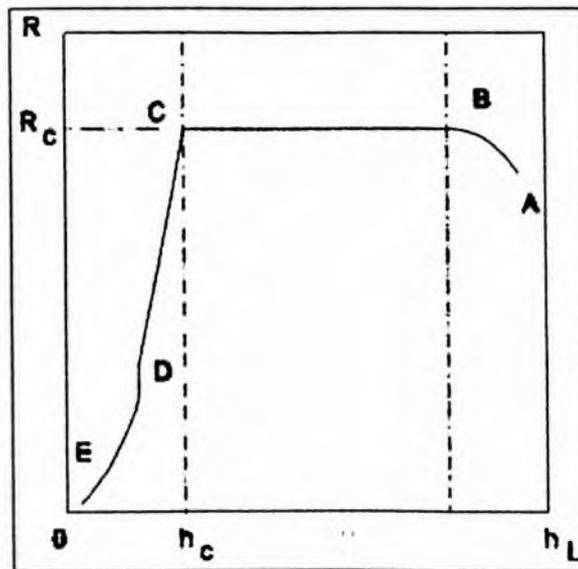
Figura II.1: Curva de secado



Fuente: McCabe W., Smith J., Harriott P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* 7<sup>ma</sup> edición. España: Mc Graw-Hill.

En la figura II.2 se representa la curva de velocidad de secado, la cual permite apreciar de una manera más clara las características de los períodos de secado. Esta curva indica que la velocidad de secado está sujeta a variar en función del tiempo o el contenido de humedad.

**Figura II.2: Curva de Velocidad de secado**



Fuente: McCabe W., Smith J., Harriott P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química 7<sup>ma</sup> edición*. España: Mc Graw-Hill.

La velocidad de secado se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$R = -\frac{W_s}{A_p} \left( \frac{\Delta X}{\Delta t} \right) \quad (\text{Ec.II.3})$$

**Dónde:**

$R$  = Velocidad de secado (kg agua/m<sup>2</sup>·min).

$W_s$  = Peso del sólido seco (kg).

$A_p$  = Superficie de contacto gas- sólidos (m<sup>2</sup>).

### **II.4.1. Descripción de las curvas de secado**

Las curvas antes mostradas representan el proceso de secado a condiciones constantes, y demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo en el cual existe un solo mecanismo que ejerza el control a lo largo de toda su duración (Perry y col., 2001).

- La región AB es conocida como período de calentamiento, e indica que la masa del alimento húmedo disminuye sólo un poco debido a la débil contribución del calor sensible a la evaporación de agua.
- La región BC es el período de velocidad constante, donde ocurre buena parte del secado y la pérdida de humedad es directamente proporcional al tiempo.
- En las regiones CD, primer período de velocidad decreciente y DE, segundo período de velocidad decreciente, la humedad del alimento disminuye menos rápido que en la región BC para incrementos de tiempo iguales.
- El punto C es el límite entre el período de velocidad constante y el de velocidad decreciente.
- El contenido crítico de humedad o humedad crítica, es el punto donde ocurre un cambio en las condiciones de secado en el cual pasa del secado a velocidad constante a velocidad decreciente.

## II.5. Clasificación de secadores

Existe una gran variedad de secadores que se diferencian por el movimiento de los sólidos en la zona de secado y la forma en que se transfiere calor. Los secadores pueden operar de forma continua o discontinua, agitando los sólidos o manteniéndolos estáticos, con cualquier tipo de material o algunos específicos.

Se clasifican en:

- **Secadores directos o adiabáticos:** son aquellos que exponen los sólidos directamente a un gas caliente. La transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con los gases calientes de secado. Estos equipos también son llamados secadores por convección (Perry y col., 2001).
- **Secadores indirectos o no adiabáticos:** estos secadores transfieren el calor desde un medio externo. El calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. Estos equipos también son llamados secadores por conducción o de contacto (Perry y col., 2001).
- **Secadores directos-indirectos:** estos secadores combinan el secado adiabático y no adiabático y son calentados por energía dieléctrica, radiante o de microondas. Este tipo de equipo depende principalmente de la generación, transmisión y absorción de rayos infrarrojos y de la colocación de los sólidos dentro de un campo dieléctrico de alta frecuencia (Perry y col., 2001).

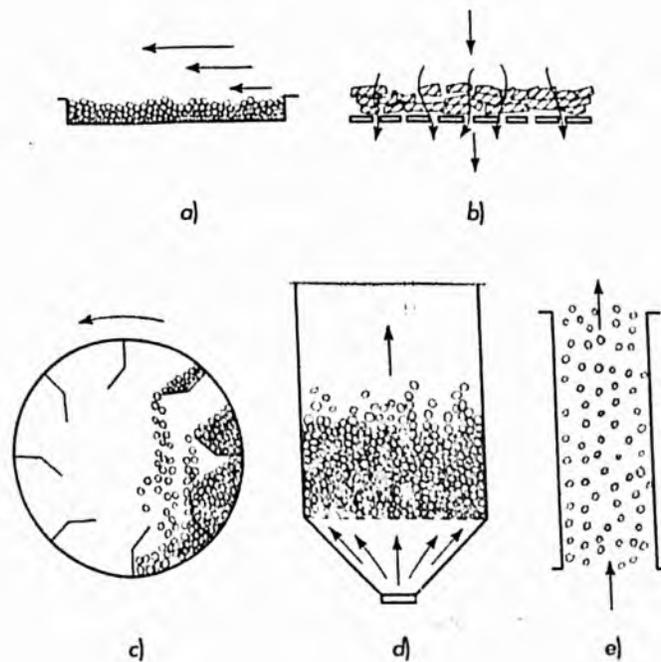
### II.5.1. Secadores adiabáticos y movimiento de los sólidos en su interior

Existen diferentes tipos de secadores adiabáticos en los cuales los sólidos pueden estar expuestos al gas en diferentes formas.

- **Secador de lecho estático de sólidos:** en este secador el gas circula sobre la superficie de un lecho o una lámina de sólidos, o bien sobre una o ambas caras de una lámina o película continua. La velocidad del gas debe mantenerse baja para evitar el arrastre de partículas sólidas. Este proceso recibe el nombre de secado con circulación transversal (Figura II.3 (a)).
- **Secador de lecho de sólidos perforados:** el gas circula a través de un lecho de sólidos granulares gruesos que están soportados sobre un tamiz, aquí también la velocidad del gas debe mantenerse baja. Este proceso recibe el nombre de secado con circulación a través del sólido (Figura II.3 (b)).
- **Secador rotatorio:** los sólidos descienden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, dando lugar a un arrastre no deseado de las partículas finas (Figura II.3 (c)).
- **Secador de lecho fluidizado:** el gas pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho (Figura II.3 (d)).

- **Secador súbito de transporte neumático:** los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente gaseosa de alta velocidad y transportados de manera neumática desde un dispositivo de mezcla a un separador mecánico (Figura II.3 (e)).

**Figura II.3: Modelos de interacción gas-sólido en los secadores:** a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos perforados; c) acción de lluvia en un secador rotatorio; d) lecho fluidizado de sólidos; e) flujo en paralelo gas-sólido en un secador súbito de transporte neumático.



Fuente: McCabe W., Smith J., Harriott P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* 7<sup>ma</sup> edición. España: Mc Graw-Hill.

## II.5.2. Transferencia de calor y masa en secadores adiabáticos

El secado de sólidos húmedos es un proceso termodinámico, donde se debe aplicar calor para lograr evaporar el líquido, en este proceso ocurren los fenómenos de transferencia de calor y transferencia de masa simultáneamente:

- **Transferencia de calor:** es el resultado de aportar la energía necesaria para que exista una transformación del agua en vapor. El calor entregado por el aire provoca que el sólido que se está secando sufra un aumento de temperatura.

En el secado de alimentos es recomendable despreciar la transferencia de calor por radiación hacia la superficie sólida, así como también suponer que no existe transferencia de calor por conducción en las superficies metálicas, sino únicamente por convección (Geankoplis, 1998) esto se puede expresar por la ecuación de Newton, para la transferencia de calor por convección entre ambos medios:

$$\dot{Q}_{gp} = h_{gp}A_p(T_g - T_p) \quad (\text{Ec.II.4})$$

**Dónde:**

$\dot{Q}_{gp}$  = Calor transferido (W).

$h_{gp}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m<sup>2</sup>·°C).

$A_p$  = Superficie de contacto gas-partícula (m<sup>2</sup>).

$T_g$  = Temperatura del fluido (°C).

$T_p$  = Temperatura superficial partícula (°C).

- **Transferencia de materia:** es la responsable de la transferencia de vapor del interior de los poros del sólido hasta la superficie.

Al igual que el fenómeno de transferencia de calor por convección, la transferencia de masa entre una superficie y un fluido receptor de la materia liberada, humedad, rige su comportamiento por una ecuación análoga a la de Newton, para la transferencia de calor por convección:

$$\dot{m} = k_{gp}A_p(c_p - c_v) \quad (\text{Ec.II.5})$$

**Dónde:**

$\dot{m}$  = Velocidad másica del aire (kg/s).

$k_{gp}$  = Coeficiente de transferencia de masa superficial gas-partícula (m/s).

$A_p$  = Superficie de contacto gas-partícula (m<sup>2</sup>).

$c_p$  = Concentración de humedad del gas en superficie de la partícula (kg/m<sup>3</sup>).

$c_v$  = Concentración de humedad en el gas (kg/m<sup>3</sup>).

A causa de algunas complicaciones en los patrones de temperatura, la verdadera diferencia de temperatura media para el secador como un todo no es fácil de definir. De hecho, por lo general, las temperaturas de salida de los sólidos y gases son tan cercanas que no es posible medir la diferencia de ambas. Por lo tanto, los coeficientes de transferencia de calor y masa son difíciles de estimar y resultan de utilidad limitada (McCabe W., 2007).

## II.6. Fundamentos de secado en lechos fluidizados

El secado por medio de la fluidización es conocido como un método de secado suave y uniforme capaz de secar hasta un contenido de humedad muy bajo con un alto grado de eficiencia.

La fluidización se logra haciendo pasar un gas, por lo general aire, a través de un lecho fijo de partículas sólidas con una alta velocidad, provocando el aumento de la caída de presión y el rozamiento sobre las partículas individuales, eventualmente las partículas comienzan a moverse quedando suspendidas en el fluido.

Existen dos tipos de fluidización dependiendo del tipo de fluido a utilizar:

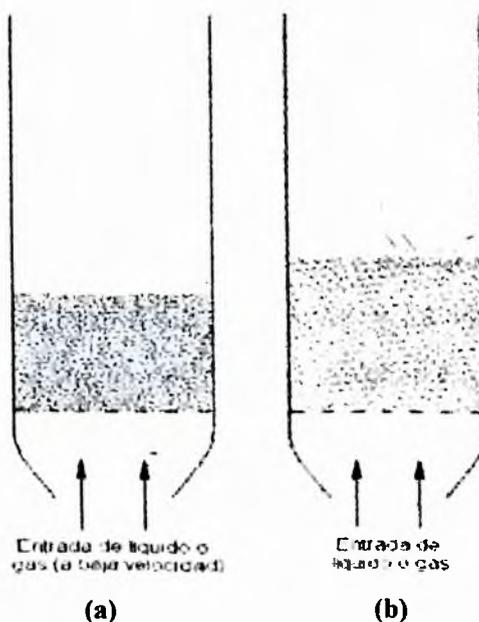
- **Fluidización homogénea:** se caracteriza por la distribución homogénea de las partículas en suspensión por todo el lecho, este comportamiento se puede visualizar cuando el fluido es un líquido y las partículas son de igual tamaño. La expansión de un lecho con una fluidización homogénea es uniforme.
- **Fluidización no homogénea o heterogénea:** este tipo de fluidización se observa en los sistemas gas-sólido, y producen grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales. La expansión del lecho se deriva principalmente del espacio ocupado por las burbujas del gas, puesto que la fase densa no se expande en forma significativa al aumentar el flujo total.

## II.6.1. Fenómenos de la fluidización

En la fluidización se muestran varios fenómenos que difieren por la velocidad a la que asciende el fluido en el lecho de partículas.

Si un fluido asciende con una baja velocidad, este se filtra por los espacios entre las partículas del lecho y permanecerán estacionarias; este estado se denomina lecho fijo (Figura II.4 (a)). Con un aumento de la velocidad se alcanza un punto donde todas las partículas se encuentran suspendidas por el flujo ascendente de gas o líquido. Este estado se denomina lecho en comienzo de fluidización (Figura II.4 (b)) y marca la transición entre el lecho fijo y el lecho plenamente fluidizado. La velocidad del fluido para que alcance esta condición se denomina velocidad mínima de fluidización y el lecho se conoce como lecho fluidizado.

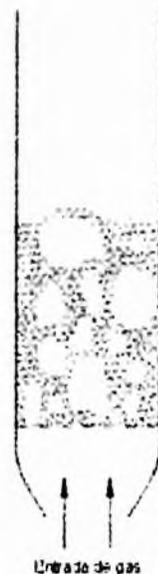
**Figura II.4: Fenómenos: a) lecho fijo, b) lecho en comienzo de fluidización**



**Fuente:** Barreira V. (2007). *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado*. (Proyecto fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, España.

Si la velocidad del fluido sigue aumentando, se obtiene una velocidad denominada velocidad mínima de burbujeo, y comienza a aparecer burbujas en el lecho dando como resultado una fluidización burbujeante (Figura II.5).

**Figura II.5: Fluidización burbujeante**



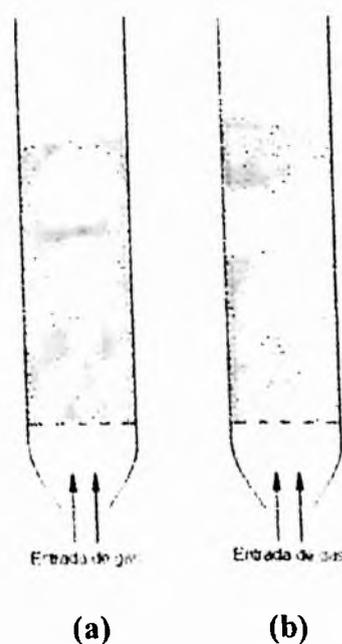
**Fuente: Barreira V. (2007). *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado*. (Proyecto fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, España.**

Con un aumento aún mayor de la velocidad del fluido, las burbujas continúan creciendo y ocupando cada vez más espacios en el lecho. Este fenómeno se denomina slugging y las burbujas se llaman slugs.

El slugging puede ser de dos tipos, dependiendo del tamaño de las partículas del lecho; Slugging con slugs axiales: ocurre si se utilizan partículas finas, y estas caen suavemente hacia abajo rodeando las burbujas por lo que se producen burbujas de mayor tamaño (Figura II.6 (a)).

En el caso de partículas mayores, la fracción de lecho por encima de las burbujas es empujada hacia arriba como un pistón y las partículas caen en forma de lluvia hasta que la burbuja finalmente se desintegra. Este comportamiento se denomina slugging con slugs de pared (Figura II.6 (b)).

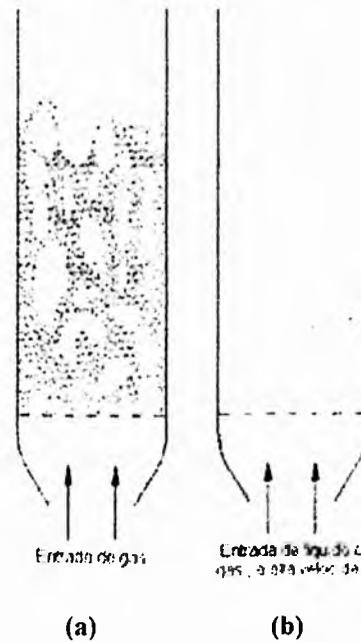
**Figura II.6: Fluidización slugging: (a) con slugs axiales (b) con slugs de pared**



**Fuente: Barreira V. (2007). *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado*. (Proyecto fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, España.**

Cuando se alcanza una velocidad del fluido suficientemente alta, se observa un movimiento de forma turbulenta de los sólidos y burbujas de diferentes tamaños. Este fenómeno es denominado fluidización turbulenta (Figura II.7 (a)). Con un aumento en la velocidad del fluido aún mayor, las partículas abandonan el lecho con el gas; en este caso se tiene un lecho fluidizado de fase dispersa con transporte neumático de partículas (Figura II.7 (b)).

**Figura II.7: Fluidización: (a) turbulenta, (b) en fase dispersa con transporte neumático**



**Fuente:** Barreira V. (2007). *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado*. (Proyecto fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, España.

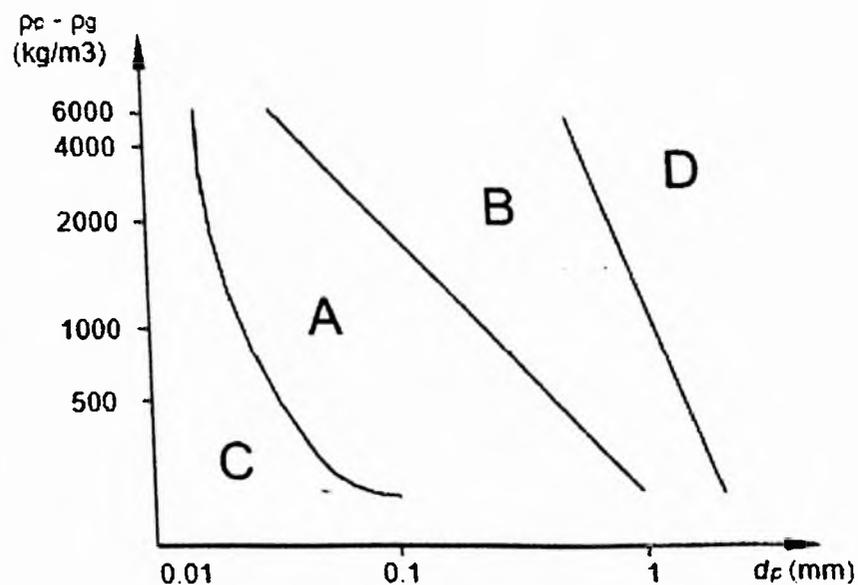
### II.6.2. Clasificación de las partículas a fluidizar

La capacidad y el modo en que las diferentes partículas fluidizan varían según su naturaleza. Geldart (1973) publica una clasificación de partículas según su tamaño, forma y densidad, así como su comportamiento durante el proceso de fluidización, la clasificación está dividida en cuatro grupos: A, B, C y D.

- **Grupo Geldart A:** son partículas pequeñas de baja densidad, con diámetro de 20 a 100 micras. Estas partículas son aereables y flotan con facilidad, presentan una alta expansión del lecho y una alta mezcla de partículas. Las partículas típicas de esta clasificación son los catalizadores de craqueo.

- **Grupo Geldart B:** este grupo contienen la mayoría de los materiales denso de tamaño medio, con diámetro de 150 micras. La mezcla de partículas y expansión de lecho son moderadas. Un ejemplo de partículas que pertenecen a este grupo es la arena de construcción.
- **Grupo Geldart C:** partículas muy finas de menos de 20 micras en los que las fuerzas de cohesión son dominantes. Estas partículas presentan baja expansión del lecho por aparición de canales y muy baja mezcla de partículas. A este grupo pertenece la harina y el cemento.
- **Grupo Geldart D:** son partículas muy grandes de mayor peso y diámetro, alcanzando tamaños mayores a las 1000 micras, también suelen ser las más densas. Tienen una baja expansión del lecho y baja mezcla de partículas. Los granos de café y la grava son ejemplos comunes de este grupo.

**Figura II.8: Clasificación de las partículas según Geldart**



Fuente: Geldart D. (1973) *Tecnología de Fluidización de Gas*. Ed. John Wiley & Sons, Gran Bretaña.

## II.7. Variables importantes en un lecho fluidizado

Las variables más importantes que intervienen en el proceso de fluidización y se deben considerar para entender mejor el comportamiento de un lecho fluidizado y poder realizar predicciones de fluidización son: el diámetro de la partícula, la esfericidad y porosidad del lecho.

### II.7.1. Diámetro de las partículas esféricas

Definido como el tamaño de la partícula basado en el área. En el caso de las partículas regulares, más o menos esféricas, el diámetro de partícula se obtiene de tamizado o de equipos medidores de tamaño de partículas.

Si el lecho tiene partículas irregulares se sustituye en la fórmula el diámetro de partícula por un diámetro medio, de todas las partículas del lecho, calculado de la siguiente forma:

$$\bar{D}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{D_p}} \quad (\text{Ec.II.6})$$

**Dónde:**

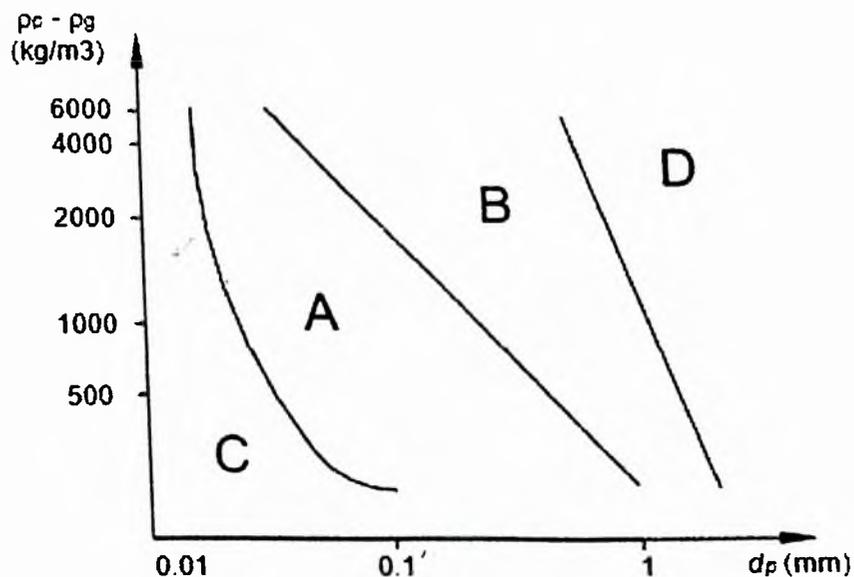
$\bar{D}_p$  = Diámetro medio de la partícula (m).

$x_i$  = Fracción másica de partículas del diámetro  $d_{pi}$ .

$D_p$  = Diámetro de partículas (m).

- **Grupo Geldart B:** este grupo contienen la mayoría de los materiales denso de tamaño medio, con diámetro de 150 micras. La mezcla de partículas y expansión de lecho son moderadas. Un ejemplo de partículas que pertenecen a este grupo es la arena de construcción.
- **Grupo Geldart C:** partículas muy finas de menos de 20 micras en los que las fuerzas de cohesión son dominantes. Estas partículas presentan baja expansión del lecho por aparición de canales y muy baja mezcla de partículas. A este grupo pertenece la harina y el cemento.
- **Grupo Geldart D:** son partículas muy grandes de mayor peso y diámetro, alcanzando tamaños mayores a las 1000 micras, también suelen ser las más densas. Tienen una baja expansión del lecho y baja mezcla de partículas. Los granos de café y la grava son ejemplos comunes de este grupo.

**Figura II.8: Clasificación de las partículas según Geldart**



Fuente: Geldart D. (1973) *Tecnología de Fluidización de Gas*. Ed. John Wiley & Sons, Gran Bretaña.

## II.8. Parámetros del lecho fluidizado

Para llevar a cabo la fluidización, existen parámetros de operación muy importantes que intervienen en este proceso, como pueden ser: la velocidad mínima de fluidización, la velocidad de operación y la caída de presión, las cuales serán descritos a continuación.

### II.8.1. Velocidad mínima de fluidización en el lecho

La velocidad mínima de fluidización de un lecho es una propiedad de la partícula que lo conforma, y se refiere a la mínima velocidad que se va a requerir para levantar en el lecho los granos que están estacionarios.

$$\bar{V}_{OM} = \left[ \frac{\Phi_s D_p g (\rho_p - \rho) \epsilon_M^3}{1.75 \rho} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. II.9})$$

**Dónde:**

$\bar{V}_{OM}$  = Velocidad mínima de fluidización (m/s).

$\Phi_s$  = Esfericidad de la partícula.

$D_p$  = Diámetro de la partícula (m).

$g$  = Aceleración gravitacional (m/s<sup>2</sup>).

$\epsilon_M$  = Porosidad mínima de fluidización.

$\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_p$  = Densidad de partícula (kg/m<sup>3</sup>).

### II.8.2. Velocidad de operación en el lecho

Se refiere a la velocidad que se debe mantener mientras dure el proceso de fluidización, de esta manera los granos están en constante movimiento. Esta velocidad se conoce por la siguiente ecuación:

$$V_o = 3\bar{V}_{OM} \quad (\text{Ec.II.10})$$

### II.8.3. Caída de presión en el lecho

La caída de presión se debe a la densidad de las partículas del lecho fluidizado y se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta p = g(1 - \epsilon_M)(\rho_p - \rho)L \quad (\text{Ec.II.11})$$

**Dónde:**

$\Delta p$  = Caída de presión ( $\text{kg/s}^2 \cdot \text{m}^2$ ).

$g$  = Aceleración gravitacional ( $\text{m/s}^2$ ).

$\epsilon_M$  = Porosidad mínima de fluidización.

$\rho$  = Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\rho_p$  = Densidad de partícula ( $\text{kg/m}^3$ ).

$L$  = Altura del lecho (m).

Esta simple relación implica que la caída de presión a través del lecho es dependiente a la velocidad del fluido.

## II.9. Ventajas de un secador de lecho fluidizado

El secado en lechos fluidizados ofrece ventajas importantes sobre los demás métodos de secado de los materiales en gránulos porque:

- Permite una mayor facilidad en el transporte de los materiales.
- El estado fluidizado garantiza que se produzca el secado desde la superficie de todas las partículas por separado y no solo de la superficie del lecho.
- La rapidez con que se mezclan las partículas facilita la consecución de valores de temperatura constantes en todo el lecho, lo que confiere sencillez y seguridad al control de la operación.
- Los recipientes pueden ser móviles, haciendo que la manipulación sea sencilla y reduce costos laborales.
- Al tener tiempos más corto de secado se eleva la producción.

**SEGUNDA PARTE**

**MARCO METODOLÓGICO**

1

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA**

La presente investigación tiene como objetivo el diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado, para ser utilizados en los laboratorios de operaciones unitarias. A continuación se proporciona la metodología del trabajo, para alcanzar los objetivos propuestos.

### **III.1. Tipo de investigación**

El siguiente estudio de investigación es de tipo experimental, debido a que los datos están basados en manipular una o varias variables independientes para conocer su efecto sobre la variable dependiente.

Este tipo de investigación se basa en la manipulación de variables en condiciones altamente controladas, replicando un fenómeno concreto y observando el grado en que la o las variables implicadas y manipuladas producen un efecto determinado. Los datos se obtienen de muestras aleatorizadas, de manera que se presupone que la muestra de la cual se obtienen es representativa de la realidad. Permite establecer diferentes hipótesis y contrastarlas a través de un método científico.

El modelo de investigación experimental, es uno de los más empleados, conforme al cual, se procede a la intervención de la realidad, para obtener cambios en la misma, con la finalidad de poder realizar estudios congruentes.

## **CAPÍTULO IV ASPECTOS PRÁCTICOS**

El capítulo IV está dividido en dos partes, la primera parte está orientada a conocer las características intrínsecas de la alimentación del equipo, las cuales influyen directamente en el comportamiento del lecho, y por consiguiente en su diseño, donde se presentan los métodos para la determinación del diámetro de los granos, la esfericidad y porosidad de los mismos. La segunda parte presenta los componentes principales que dispone el diseño del prototipo de secador de lecho fluidizado el cual depende de las características de la alimentación.

### **IV.1. Características de la alimentación**

En este trabajo de grado la muestra a analizar para la valoración del secado es el maíz recolectado de los cultivos de República Dominicana.

El maíz es uno de los cereales más importantes del mundo, constituye junto al arroz y al trigo, uno de los principales alimentos en grano más utilizado en la alimentación humana y animal por su alto contenido de fibras y vitaminas.

El grano de maíz llega a su madurez fisiológica cuando su contenido de humedad alcanza un 37-38% (Revista Agrosíntesis, 2016) pero para su comercialización, exportación y almacenamiento este debe cumplir con un contenido de humedad de 10-14% según la Normas de Inocuidad de los productos Agrícolas Frescos (PennState Extension, 2018).

#### **IV.1.1. Diámetro de los granos**

Para la correcta determinación del diámetro de los granos de maíz a fluidizar, se utiliza un equipo medidor de tamaño de partículas, donde cada grano se separa y se mide con un aparato calibrado, en este caso un calibrador electrónico digital (Fig. 2, anexo V).

#### **IV.1.2. Esfericidad de las partículas**

La esfericidad es la manera más apropiada de conocer el grado de redondez de un grano, esta variable se calcula por medio de la ecuación II.7 que se encuentra en el capítulo II sección 7.2., de este trabajo.

$$\Phi_s = \frac{6/D_p}{S_p/v_p} \quad (\text{Ec.II.7})$$

#### **IV.1.3. Porosidad de las partículas**

La porosidad del lecho ( $\epsilon$ ) cuando inicia la fluidización recibe el nombre de porosidad mínima de fluidización ( $\epsilon_M$ ). Para partículas regulares esta porosidad está comprendida en 0.45 (McCabe y col., 2007).

#### IV.1.4. Velocidad mínima de fluidización en el lecho

La ecuación II.9 establece que se puede calcular la velocidad mínima de fluidización a partir de las características de las partículas: densidad, diámetro, esfericidad y porosidad mínima de fluidización, dicha ecuación se muestra en el capítulo II sección 8.1.

$$\bar{V}_{OM} = \left[ \frac{\Phi_s D_p g (\rho_p - \rho) \epsilon_M^3}{1.75 \rho} \right]^{1/2} \quad (\text{Ec.II.9})$$

#### IV.1.5. Velocidad de operación en el lecho

La velocidad de operación tiene una relación directa con la velocidad mínima de fluidización. Se calcula por medio de la ecuación II.10 definida en la sección 8.2.

$$V_o = 3\bar{V}_{OM} \quad (\text{Ec.II.10})$$

#### IV.1.6. Caída de presión en el lecho

Se refiere a la diferencia de presión que va a existir en el lecho fluidizado. Para calcular la caída de presión del equipo, se toma la ecuación II.11 del capítulo II sección 8.3. La cual toma en consideración los parámetros constantes del aire y las características del grano a fluidizar.

$$\Delta p = g(1 - \epsilon_M)(\rho_p - \rho)L \quad (\text{Ec.II.11})$$

## **IV.2. Secador de lecho fluidizado**

Es un equipo que trabaja bajo el principio de fluidización, y se utiliza para el secado rápido de sólidos granulares por medio del contacto directo entre el aire caliente y el sólido.

El secador de lecho fluidizado dispone de cuatro partes principales:

- Sistema de suministro de aire
- Sistema de calentamiento de aire
- Lecho de fluidización
- Sistema de medición de temperatura

### **IV.2.1. Sistema de suministro de aire**

El sistema de suministro de aire, como su nombre lo indica, es un equipo destinado a mover o suministrar el aire necesario para realizar el proceso de fluidización y secado. Un suministro de aire puede ser un ventilador, un soplador o un compresor.

### **IV.2.2. Sistema de calentamiento de aire**

El sistema de calentamiento de aire, es un dispositivo que se utiliza para aumentar la temperatura del aire. La forma de transferencia de calor se puede ser de forma directa o indirecta, y producir calor a partir de la combustión o de tipo eléctrica.

### **IV.2.3. Lecho de fluidización**

Se constituye por una cámara donde se efectúa el proceso de secado, este es un lecho que como consecuencia de las condiciones entrada del fluido, ocurre la fluidización, quedando suspendidas las partículas.

### **IV.2.4. Sistema de medición de temperatura**

La medida de la temperatura constituye una de las más importantes que se efectúan en este tipo de sistemas, las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación están son: la precisión, velocidad de captación de temperatura, distancia entre el elemento de medida, el equipo y por el tipo de instrumento indicador.

## CAPÍTULO V CÁLCULOS Y DISEÑO DEL EQUIPO

En este capítulo, se describen las especificaciones de diseño del prototipo de secador de lecho fluidizado. Los factores limitantes de este trabajo de grado son: un ventilador centrífugo y un recipiente cilíndrico que funciona como lecho de fluidización, en base a esto se realizan los cálculos y modificaciones correspondientes.

### V.1. Características de la alimentación

En el proceso de fluidización, las características de la alimentación y el aire definen el comportamiento del lecho fluidizado e influyen directamente en el tiempo y calidad de secado. En la tabla V.1, se presentan los parámetros de operación del aire y las características de los grano de maíz.

**Tabla V.1. Parametros del aire y características de alimentación**

<b>Grano de maíz</b>				
Diámetro ( $D_p$ )	Esfericidad ( $\Phi_s$ )	Porosidad mínima ( $\epsilon_m$ )	Densidad ( $\rho_p$ )	
0.0036 m	0.62	0.45	820 kg/m <sup>3</sup>	
<b>Aire</b>				
Gravedad específica (g)	Densidad ( $\rho$ )	Temperatura Ambiente (T°C)	Humedad Relativa (HR)	Calor Especifico ( $C_p$ )
9.80665 m/s <sup>2</sup>	1.29 kg/m <sup>3</sup>	30.4°C	83%	1005 J/kg.°C

**Fuente: Weather atlas (abril, 2020). Previsión meteorológica y clima mensual, Santo Domingo, República Dominicana.**

### V.1.1. Velocidad mínima de fluidización en el lecho

A partir de las características de la alimentación se estima el comportamiento del lecho fluidizado y se calcula la velocidad mínima de fluidización, que define el paso del estado de lecho fijo al de lecho fluidizado:

$$\bar{V}_{OM} = \left[ \frac{(0.62)(0.0036m)(9.80665 \frac{m}{s^2})(820 \frac{kg}{m^3} - 1.29 \frac{kg}{m^3})(0.45)^3}{1.75(1.29 \frac{kg}{m^3})} \right]^{1/2} = 0.85 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec.II.9})$$

### V.1.2. Velocidad de operación en el lecho

La velocidad de operación, se refiere a la velocidad que se debe mantener mientras dura el proceso de fluidización, de esta manera los granos están en constante movimiento.

$$V_o = 3 \left( 0.85 \frac{m}{s} \right) = 2.55 \frac{m}{s} \quad (\text{Ec.II.10})$$

### V.1.3. Caída de presión en el lecho

Se refiere a la diferencia de presión que va a existir en el lecho.

$$\Delta\rho = 9.80665 \frac{m}{s^2} (1 - 0.45) \left( 820 \frac{kg}{m^3} - 1.29 \frac{kg}{m^3} \right) (0.15m) \quad (\text{Ec.II.11})$$

$$\Delta\rho = 662.38 \frac{kg}{s^2 \cdot m}$$

## V.2. Secador de lecho fluidizado

Los procedimientos de diseño que se consideran a continuación son fundamentales para determinar las dimensiones del prototipo de secador de lecho fluidizado.

### V.2.1. Sistema de suministro de aire

Como factor limitante se utilizar un ventilador centrífugo de baja presión, el cual aporta la energía para el movimiento de aire en el interior del equipo, dicho ventilador trabaja con un motor marca GE de 1/8 HP de potencia, con una velocidad angular máxima de 1500 rpm y una frecuencia máxima de 60 Hz (Fig. 3, anexo V).

De los datos del fabricante obtenidos del ventilador, se realiza una doble conversión de la velocidad angular para obtener la velocidad lineal de aire entregada al sistema, considerando las dos salidas de los ductos del ventilador:

$$w = 1500 \frac{rev}{min} \cdot \frac{2\pi rad}{1 rev} \cdot \frac{1 min}{60 s} = 157.08 \frac{rad}{s}$$

$$v = 157.08 \frac{rad}{s} \cdot \frac{0.15m}{2} = 12 \frac{m}{s}$$

Dónde:

$w$  = Velocidad angular (rpm).

$v$  = Velocidad lineal del aire (m/s).

Conociendo la velocidad lineal de aire que suministra el ventilador, y con el propósito de unificar este flujo de aire hacia el interior del sistema, se considera diseñar una campana de forma geométrica simple, que se ajuste a la carcasa del ventilador, para así permitir un mejor aprovechamiento del aire y la energía. Partiendo de este punto se calcula el área de la campana con la siguiente ecuación:

$$A_T = A_l + A_s + A_i \quad (\text{Ec.V.1})$$

Dónde:

$A_T$  = área total de la campana ( $m^2$ ).

$A_l$  = área lateral ( $m^2$ ).

$A_s$  = área superior ( $m^2$ ).

$A_i$  = área inferior ( $m^2$ ).

Sustituyendo los valores:

$$A_l = \left( \frac{0.62 \text{ m} + 0.46 \text{ m}}{2} \right) (0.40 \text{ m}) = 0.22 \text{ m}^2$$

$$A_s = (0.14 \text{ m})(2 \text{ m}) = 0.28 \text{ m}^2$$

$$A_i = (0.62 \text{ m})(0.10 \text{ m}) = 0.062 \text{ m}^2$$

$$A_T = 0.57 \text{ m}^2$$

Se propone que la campana, parte exterior del ventilador, se construya con tola galvanizada, ya que este es un material económico, resistente a la oxidación, moldeable y no interfiere en la transferencia de calor del sistema.

Con los datos obtenidos de la velocidad lineal que aporta el ventilador al sistema, y el área de la sección de la campana, se procede a calcular el caudal del aire volumétrico conocido también como CFM, a partir de la ecuación de continuidad del caudal volumétrico:

$$Q = v \cdot A_T \quad (\text{Ec.V.2})$$

Dónde:

$Q$  = Caudal de aire volumétrico ( $m^3/s$ ).

$v$  = Velocidad lineal del aire ( $m/s$ ).

$A_T$  = Área total de la campana ( $m^2$ ).

Entonces la ecuación (V.2) es:

$$Q = \left(12 \frac{m}{s}\right) (0.57 m^2) = 6.84 \frac{m^3}{s} \approx 14,493 \frac{ft^3}{min}$$

Este caudal de flujo es constante ya que el ventilador opera a una velocidad de giro constante ( $rpm=cte.$ ) y sobre un sistema que no implica cambios de resistencias es decir sin modificación del área.

Una vez conocido el área y el caudal del ventilador, se debe calcular el rendimiento con el que este trabaja. El rendimiento se define como el cociente entre la potencia que entrega el ventilador al aire dividida por la potencia que el ventilador recibe en su eje.

Esta expresión queda definida por la ecuación (V.3):

$$\eta = \frac{P_A}{P_B} \quad (\text{Ec.V.3})$$

Dónde:

$\eta$  = Rendimiento del ventilador.

$P_A$  = Potencia entregada por el ventilador (W).

$P_B$  = Potencia recibida por el eje del ventilador (W).

La potencia entregada al aire por el ventilador, depende del caudal que circula, y la potencia que recibe el ventilador en su eje se obtiene de los datos de funcionamiento provistos por los fabricantes, y depende del tamaño de ventilador seleccionado. A partir de la ecuación de Bernoulli, la cual se utiliza para estudiar el comportamiento del aire en los ventiladores, se obtiene la ecuación de la presión dinámica:

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2g} \quad (\text{Ec.V.4})$$

Dónde:

$p_d$  = Presión dinámica (mmcda).

$\rho$  = Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).

$v$  = Velocidad lineal (m/s).

$g$  = Aceleración gravitacional ( $\text{m/s}^2$ ).

Sustituyendo los valores en la ecuación (V.4), queda definida como:

$$p_d = \frac{\left(1.29 \frac{kg}{m^3}\right) \left(12 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9.80665 \frac{m}{s^2}\right)} = 9.47 \text{ mmcda}$$

La suma algebraica de la presión dinámica y estática se conoce como presión total del sistema, que es una medida del contenido energético del aire:

$$p_t = p_e + p_d \quad (\text{Ec.V.5})$$

Dónde:

$P_t$  = Presión total (mmcda).

$p_d$  = Presión dinámica (mmcda).

$p_e$  = Presión estática (mmcda).

Remplazando los valores en la ecuación (V.5):

$$p_t = 10,332.27 \text{ mmcda} + 9.47 \text{ mmcda} = 10,341.74 \text{ mmcda}$$

Como se menciona anteriormente, la potencia entregada al aire por el ventilador va a depender del caudal que circula multiplicado por la presión total del sistema, expresado por la siguiente ecuación:

$$P_A = Q \cdot p_t \quad (\text{Ec.V.6})$$

Dónde:

$P_A$  = Potencia de entrega del ventilador (W).

$Q$  = Caudal de aire volumétrico ( $m^3/s$ ).

$P_t$  = Presión total (mmcda).

Remplazando los valores en la ecuación (V.6) se obtiene la potencia entregada al sistema:

$$P_A = \left( 6.84 \frac{m^3}{s} \right) (10,341.74 \text{ mmcda}) = 70,737 \text{ W} \approx 0.094 \text{ HP}$$

Finalmente, se calcula el rendimiento del ventilador por medio de la ecuación (V.3):

Dónde:

$P_B$  = Potencia recibida por el eje del ventilador (0.125 HP)

$$\eta = \frac{0.094 \text{ HP}}{0.125 \text{ HP}} = 0.75$$

Según este resultado el rendimiento práctico del ventilador es de 75%.

### V.2.2. Sistema de calentamiento de aire

Conociendo el caudal y la forma geométrica del suministro de aire, para el sistema de calentamiento del aire, se consideran las siguientes dimensiones generales: largo, altura, forma, y medio energético para calentar el aire.

Se propone, que la energía requerida para aumentar la temperatura del aire sea de tipo eléctrica, y proceda de resistencias óhmicas colocadas dentro de un ducto cuadrangular que se ajuste al diseño del suministro del fluido.

Aplicando la primera ley de la termodinámica, se puede decir que el suministro de calor necesario para calentar el aire de una temperatura promedio ambiente de 30.4°C a 140°C máximo se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_T = \dot{m}c_p\Delta T \quad (\text{Ec.V.7})$$

Dónde:

$Q_t$  = Calor necesario (W).

$\dot{m}$  = Velocidad másica del aire (kg/s).

$c_p$  = Calor específico del aire (J/kg·°C).

$\Delta T$  = Diferencial de temperatura entre la entrada y salida del aire (°C).

Esta ecuación nos dice que la temperatura de operación junto con la velocidad másica del aire, el calor específico y la cantidad de producto a secar, son los factores más dominantes a lo que respectan los tiempos de secado.

La velocidad másica del aire viene dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = A\rho v \quad (\text{Ec.V.8})$$

Dónde:

$\dot{m}$  = Velocidad másica del aire (kg/s).

$A$  = Área de intercambio de calor (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).

$v$  = Velocidad lineal del aire (m/s).

Reemplazando los valores en la ecuación (V.8), se obtiene:

$$\dot{m} = (0.014 \text{ m}^2) \left(1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(12 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 0.22 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Entonces el calor necesario será:

$$Q_T = \left(0.22 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(1005 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right) (140^\circ\text{C} - 30.4^\circ\text{C}) = 24,232 \text{ W}$$

Con este resultado se considera instalar una resistencia eléctrica de 12.2  $\Omega$ , la cual proporciona 24,400 W para llevar a cabo el proceso de secado, y este se convierte en el calor transferido al sistema (Fig. 5 y 6, anexo V).

Del calor suministrado se estima el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lecho, a partir de la ecuación II.4, donde la diferencia de temperatura entre el fluido y la partícula en el lecho es de 100° C.

Sustituyendo los valores en la ecuación II.4:

$$h_{gp} = \frac{24,400 \text{ W}}{(0.15\text{m})(135^{\circ}\text{C}-35^{\circ}\text{C})} = 1,626 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec.II.4})$$

### V.2.3. Lecho de fluidización

Además del ventilador, el recipiente cilíndrico que se utiliza como lecho de fluidización es otro factor limitante para el diseño del prototipo de secador de lecho fluidizado.

Este recipiente cilíndrico está fabricado en acero inoxidable, lo que lo hace manejable a la hora de realizar cualquier modificación deseada, además, este material es el más adecuado para el buen manejo de los alimentos, ya que estos se deben procesar en equipos que permitan mantener su inocuidad. El acero inoxidable es también un material resistente a la corrosión, la humedad y la temperatura con la que se esté operando (Fig. 4, anexo V).

A este recipiente se le propone realizar una perforación en la parte inferior, para que sea el orificio de entrada de aire caliente, al mismo tiempo colocarle una malla metálica con orificios que realice la función de distribuidor de aire y no permita el paso de partículas al sistema de calentamiento.

Para conectar el lecho con los demás componentes del equipo, se propone colocar una tubería metálica con un ángulo de  $90^\circ$  con un diámetro que se ajuste a la entrada del lecho y salida del suministro de fluido.

Tomando en cuenta que el aire de entrada que proviene del suministro de fluido debe tener un orificio de salida, se propone elaborar una tapa de malla metálica que permita la salida del aire caliente pero evite la entrada y salida de partículas del lecho. En la figura 7 del anexo V se proyecta un prototipo en cartón que sirve de apoyo al diseño.

#### **V.2.4. Sistema de medición de temperatura y tiempo de operación**

Es de interés general conocer los gradientes de temperaturas que se producen en el sistema, por tal motivo, se propone colocar sensores de temperaturas en diferentes partes del equipo:

Se propone instalar el primer sensor digital de temperatura en el interior del compartimiento de resistores, con la finalidad de conocer el aumento de temperatura entre la entrada y salida del aire hacia el lecho.

Se proponer instalar el segundo sensor digital de temperatura en la entrada del lecho de fluidización, para poder obtener lecturas de la temperatura en el lecho y poder estimar los coeficientes de transferencia de calor.

Con el fin de proporcionar un monitoreo confiable de los límites de temperatura en el sistema, se propone colocar un panel que muestre tanto la temperatura del módulo de resistores, como la temperatura del lecho.

Para controlar los tiempos de secado, se propone instalar un segundo panel de control con un temporizador, cuya función es realizar paradas automáticas al equipo en tiempos estimados, esto garantiza un proceso de secado más controlado.

## **CAPITULO VI VALORACIÓN DEL SECADO**

Para la valoración del secado en el prototipo de secador de lecho fluidizado, se utiliza una muestra de maíz, del cual se determina el contenido de humedad, y luego se construyen las curvas de pérdida de peso, pérdida de humedad y velocidad de secado, con el fin de conocer el comportamiento del equipo.

### **VI.1. Determinación del contenido de humedad**

En el laboratorio, se determina el contenido de humedad de los granos maíz de acuerdo al método de secado directo descrito por la norma oficial mexicana NOM-147-SSA1-2009, donde se calcula la pérdida de peso hasta peso constante a una temperatura de 105°C (+/-) por 3 horas. Por medio de la ecuación II.1 se obtiene el contenido de humedad total del maíz expresado en porcentaje.

### **VI.2. Obtención de las curvas de secado en el prototipo de secador de lecho fluidizado**

Para obtener las curvas de secado del maíz se pesan 115 g de la muestra y se coloca en el prototipo de secador por un periodo de 2 horas. Se monitorea la pérdida de peso durante todo el proceso, pesando la muestra cada 20 minutos hasta peso constante. Con los datos obtenidos se construye la tabla de peso con respecto al tiempo. Para elaborar la curva de humedad en base seca con respecto al tiempo se utiliza la ecuación II.2, y para conocer la velocidad de secado se utiliza la ecuación II.3 de este trabajo.

## **TERCERA PARTE**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO VII DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El prototipo de secador de lecho fluidizado es un dispositivo de secado, que actúa bajo el principio de la fluidización y tiene como función principal el secado de alimentos en granos. El aire a presión entra a través del ventilador, que es una cámara cerrada de tola galvanizada y se conecta con el sistema de calentamiento de aire donde ocurre el aumento de temperatura, luego el aire caliente entra al lecho de fluidización donde se encuentran los granos que conforman el lecho, y por transferencia de calor y masa ocurre el proceso de secado.

### **VII.1. Sistema de suministro de aire**

Se presenta un ventilador centrífugo que opera de forma eléctrica a una velocidad de aire de 12 m/s y entrega un caudal de 6.84 m<sup>3</sup>/s a presión y temperatura ambiente promedio. La parte exterior del ventilador está construida con tola galvanizada que es un material económico y resistente a la oxidación.

### **VII.2. Sistema de calentamiento de aire**

El sistema de calentamiento de aire es un ducto cuadrangular fijado a la salida del sistema de suministro de aire y consta de una resistencia en forma de espiral colocada en serie sobre una base de cerámica la cual permite la estabilidad de las resistencias en el centro del ducto. La capacidad total de la resistencia es de 12.2  $\Omega$  y 10 de amperaje que suministran 24,400 W al proceso de secado.

### **VII.3. Lecho de fluidización**

Se presenta un lecho de fluidización con las siguientes características:

- Un lecho de acero inoxidable, enroscable con un diámetro inferior de 5 pulgada, una altura de lecho de 13 pulgada y un diámetro superior de 12 pulgada.
- Un distribuidor de aire que es una placa perforada que permite la entra del fluido pero evita que las partículas que reposan sobre él se cuelen por el sistema.
- Tapa de acero inoxidable con malla la cual garantiza que se mantenga el diferencial de presión en el lecho, prevé la perdida de sólido y permite la visibilidad del fenómeno de fluidización.

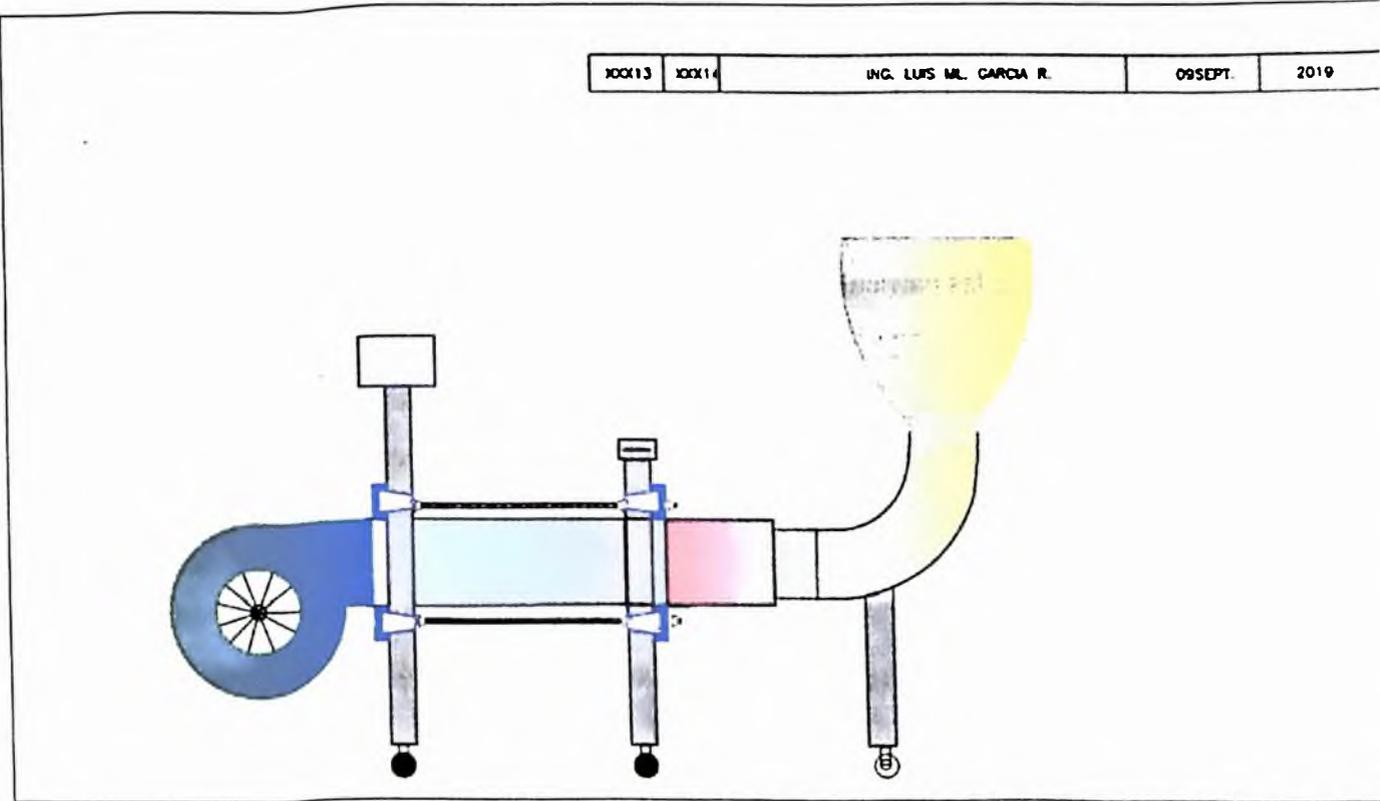
### **VII.4. Sistema de medición de temperatura y tiempo de operación**

La medida de la temperatura se lleva a cabo por un sensor de temperatura MT-512E 2HP que mide y controla temperaturas hasta 200 °C / 392 °F, con una resolución de 0.1 C y potencia máxima de 2 HP.

El tiempo de secado es controlado por un TIMER 600W LEVINTON LTB60-1LZ, prefijado en cuatro opciones de 10 a 60 min.

En la figura VII.1 se muestra el resultado del diseño secador de lecho fluidizado.

**Fig.VII.1. Prototipo de secador de lecho fluidizado**



Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

## CAPÍTULO VIII RESULTADOS VALORACIÓN DEL SECADO

Este capítulo presenta las diferentes curvas de secado que representan el desempeño del prototipo de secador de lecho fluidizado, con respecto a la muestra de maíz utilizada.

### VIII.1. Determinación del contenido de humedad

La tabla VIII.1, muestra los resultados prácticos de la determinación del contenido de humedad de una muestra de maíz. Este análisis se realiza por triplicado para asegurar la confiabilidad de los resultados, en cuanto a repetitividad, en la figura I del anexo V se muestra los materiales utilizados para este análisis.

**Tabla VIII.1. Determinación del contenido de humedad del maíz**

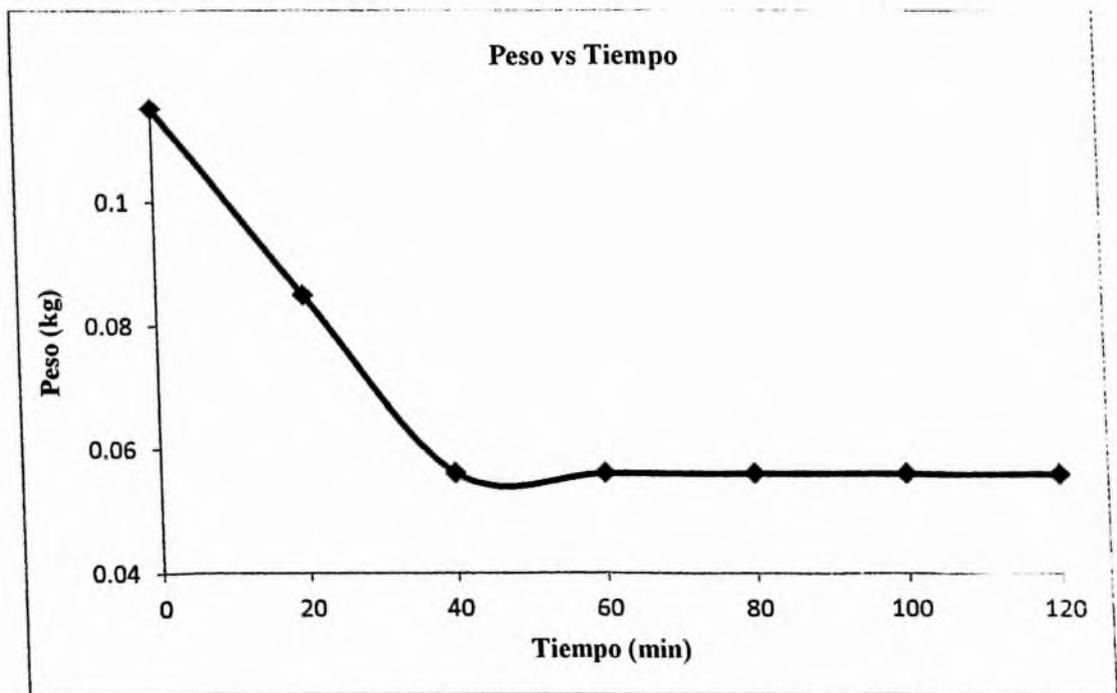
Cápsula (kg)	W <sub>o</sub> (kg)	Cápsula+W <sub>o</sub> (kg)	Cápsula+W <sub>s</sub> (kg)	W <sub>d</sub> (kg)	W <sub>w</sub> (kg)	M <sub>wb</sub> (%)
2.52E-02	5.43E-03	3.06E-02	2.79E-02	2.69E-03	2.74E-03	50%
2.52E-02	5.40E-03	3.06E-02	2.79E-02	2.64E-03	2.76E-03	51%
2.52E-02	5.50E-03	3.07E-02	2.80E-02	2.66E-03	2.84E-03	51%

**Fuente:** García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

## VIII.2. Curva de peso en el prototipo de secador de lecho fluidizado

La curva de peso que se representa en la figura VIII.1, relaciona la pérdida de peso en función del tiempo en el prototipo de secador de lecho fluidizado, a una temperatura inicial de 135°C. En la tabla 1 del anexo II se muestran los datos experimentales.

Figura VIII.1: Curva de pérdida de pesos en el secador

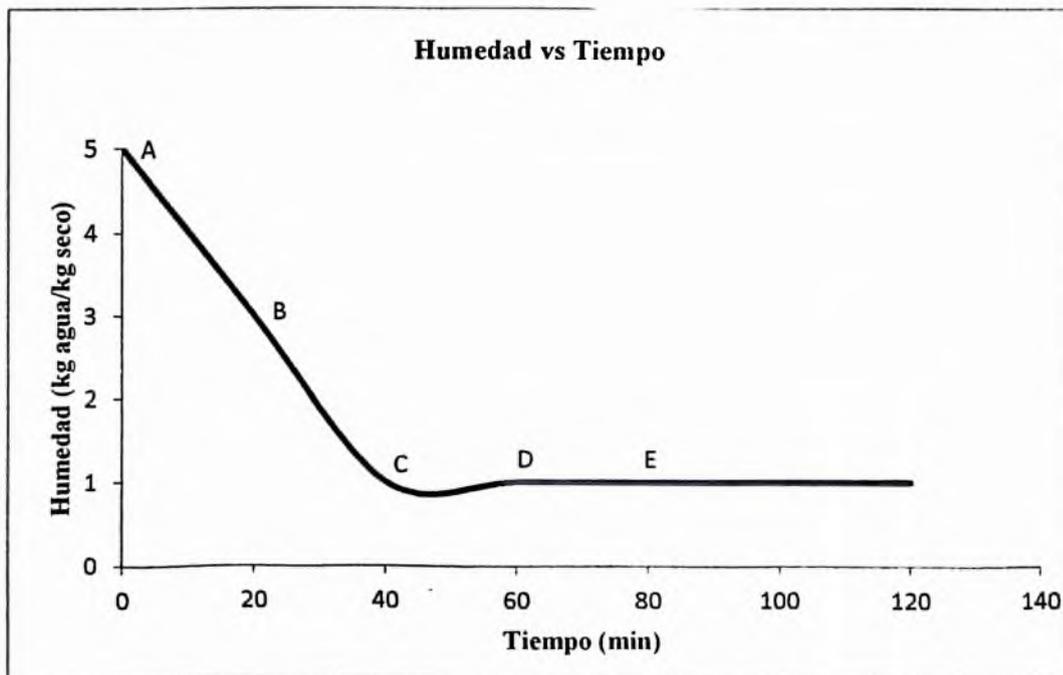


Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

### VIII.3. Curva de humedad en el prototipo de secador de lecho fluidizado

La figura VIII.2, muestra la curva de secado de una muestra de maíz en el prototipo de secador de lecho fluidizado, expresado como el cambio de la humedad en base seca frente al tiempo, a una temperatura inicial de 135°C. En el anexo II tabla 2 se encuentra los datos experimentales de los cambios en la humedad con respecto al tiempo.

**Figura VIII.2: Curva de pérdida de humedad en el secador**

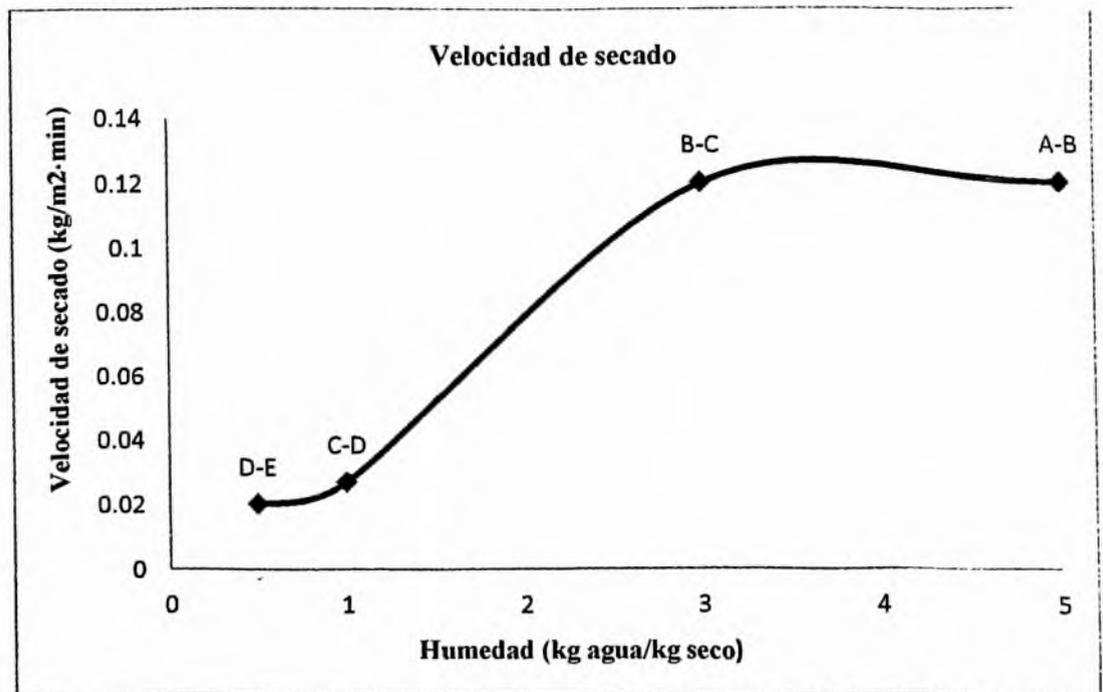


Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

#### VIII.4. Curva de velocidad de secado en el prototipo de secador de lecho fluidizado

En la figura VIII.3 se representan los cambios de velocidad de secado que experimenta el maíz con el pasar del tiempo en que se realiza el proceso, y se le compara con los valores de humedad para poder así describir el comportamiento en cada periodo. En el anexo II tabla 3 se presentan los datos experimentales.

**Figura VIII.3: Curva de velocidad de secado en el secador**



Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

#### VIII.4.1. Tiempo secado

La tabla VIII.2 muestra los tiempos de secado de cada uno de los periodos que se describen en la figura VIII.3.

**Tabla VIII.2. Tiempo de secado a nivel experimental**

Periodos	Tiempo (min)	Etapas	Velocidad (kg/m <sup>2</sup> min)
A-B	0-20	Pre calentamiento	0.12
B-C	20-40	Velocidad constante	0.12
C-D, D-E	40-120	Velocidad decreciente	0.028

**Fuente:** García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

## **CAPÍTULO IX ANÁLISIS VALORACIÓN DEL SECADO**

Este capítulo presenta el análisis de los resultados de cada curva de secado obtenida del secador piloto de lecho fluidizado.

### **IX.1. Determinación del contenido de humedad**

El contenido de humedad promedio expresado en porciento de una muestra de maíz es de 51% en base húmeda.

### **IX.2. Curva de peso en el prototipo de secador de lecho fluidizado**

Se observa que la mayor pérdida de peso se produce en los primeros 40 minutos del secado y que luego hay una disminución menor del peso en el tiempo restante.

### **IX.3. Curva de humedad en el prototipo de secador de lecho fluidizado**

Se puede observar el desempeño del secado, desde el punto de vista de la humedad en base seca, con respecto al tiempo. Durante los primeros 40 minutos del proceso, hay una disminución significativa en la humedad del sólido. Mientras que la caída de humedad es algo menor a partir de los 60 minutos del secado.

#### **IX.4. Curva de velocidad de secado en el prototipo de secador de lecho fluidizado**

Al observar la curva de velocidad de secado del maíz, se puede notar claramente que se presentan 4 periodos de velocidad bien marcados que se describen a continuación:

En el intervalo A-B periodo de precalentamiento, existe una disminución de la velocidad de secado, esto se produce ya que en este periodo la velocidad se ajusta a las condiciones que se representa al comienzo del secado.

En el siguiente periodo, al que se denomina periodo B-C, se observa que la velocidad se mantiene constante, en este periodo el sólido todavía posee una cantidad importante de agua que se elimina con facilidad.

El intervalo C-D es el primer período de velocidad decreciente, y en el intervalo D-E se observa un segundo periodo de velocidad decreciente, que finaliza al llegar a la humedad de equilibrio. Por lo tanto se concluye de acuerdo a la figura, que el valor de humedad crítica (punto C), es de 1 kg agua/kg seco, es decir cuando cambia el periodo de velocidad constante a periodo de velocidad decreciente.

##### **IX.4.1. Tiempo secado**

Dentro del secado se puede observar que se toma un tiempo aproximado de 40 minutos para pasar de una velocidad constante de  $0.12 \text{ kg/m}^2\text{-min}$  a una velocidad decreciente de  $0.028 \text{ kg/m}^2\text{-min}$  lo que da un producto seco con un porcentaje de humedad de 10%.

## **CUARTA PARTE**

### **CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES**

## **CONCLUSIÓN**

## CONCLUSIÓN

Se logra diseñar, construir y poner en marcha un prototipo de secador de lecho fluidizado a partir de piezas reutilizadas con los componentes principales que conforman estos equipos a nivel industrial, lo que permite realizar prácticas de secado por medio de la fluidización en los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

El prototipo de secador de lecho fluidizado está construido en tola galvánica y acero inoxidable, lo que asegura la máxima durabilidad, resistencia a golpes y a la corrosión del ambiente. El tamaño del equipo lo hace especialmente manejable, así como la alta versatilidad de sus partes desarmable lo hace fácil de limpiar y dar mantenimiento.

Considerando que el equipo es para uso de prácticas en el laboratorio, la capacidad máxima se fija en un rango de 100-150 g y se limita a trabajar con partículas del grupo D según la clasificación Geldart, como ejemplo: arroz, maíz, café, trigo, avena; o diferentes tipos de semillas como: ahuyama, girasol, sésamo, etc. El equipo en cuestión se puede clasificar como un prototipo de secador adiabático discontinuo de lazo abierto, que opera de forma automática después de ingresar el tiempo de secado, la cantidad y el tipo de producto agrícola a trabajar, dentro del límite establecido.

El desempeño del equipo presenta una eficacia en el secado de la muestra de maíz, donde por medio de curvas de secado se muestra una disminución de su contenido de humedad de 51% a un 10%, en un periodo de 40 minutos. En cuanto al comportamiento de las partículas en el lecho de fluidización, se observa un tipo de fluidización heterogénea, con fenómeno turbulento, debido a la alta velocidad del fluido.

En la parte energética, el calor que suministran las resistencias al proceso de secado es de 24,400 W, este calor suple la necesidad de 24,232 W que según los cálculos teóricos demanda el proceso de secado. El gasto de energía del equipo se estima en 2.4 KW/h por cada práctica de secado, el costo total de trabajo energético es de 313.6 pesos por mes.

Comparando las velocidades de secado con el secado natural, el equipo muestra una eficiencia de 91%, sin embargo desde el punto de vista de la carga del cereal tratado y el consumo energético, sumado a las pérdidas por el diseño el prototipo de secador no es eficiente.

## **RECOMENDACIONES**

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario continuar investigando sobre el tema de secado artificial, con el fin de ampliar las bibliografías y el desarrollo de esta técnica en República Dominicana.
  
2. Se pueden implementar mejoras al prototipo, por ejemplo incluir un ciclón para la recolección de granos y para considerar colocar un recubrimiento térmico alrededor del ducto por donde circula el flujo caliente para disminuir las pérdidas de calor y flujo de aire.
  
3. Antes de realizar prácticas de secado, es necesario conocer los parámetros y características intrínsecas de los granos a secar, dentro de los que citan: diámetro del grano, porosidad, esfericidad y densidad, esto para poder suponer el comportamiento del lecho cuando se encuentre en estado fluidizado.
  
4. Es recomendable seguir el manual de operación del prototipo de secador de lecho fluidizado y mantener en perfecto estado el sistema, para evitar fugas de calor por golpes o hendiduras.

**QUINTA PARTE**

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## LIBROS

Badui D. S. (1993), *Química de los Alimentos*. Madrid, España: Pearson Educación.

Bird R., Stewart W., Lightfoot E. (2012). *Fenómenos de transporte* 2<sup>da</sup> edición. México: Limusa.

Brennan J., Butters J., Cowell N. (1998). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. España: Acribia, S.A.

Davidson J., Clift R., Harrison D. (1985). *Fluidización*. 2<sup>da</sup> edición. Estados Unidos: Academic press, pp 1-23.

Fellows. (1994) *Tecnología del Procesado de los Alimentos*. España: Acribia, S.A.

Foust A. (1990). *Principios de Operaciones unitarias*. México: Ceca.

Geankoplis C. (1999). *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. México: Patria, S.A.

Harper E. (2007). *El ABC de las instalaciones eléctricas industriales*. México: Limusa.

Henley E., Rosen E. (1979). *Cálculo de balance y materia de energía*. España: Reverté, S.A.

Levenspiel O. (2015). *Ingenierías de las reacciones químicas* 3<sup>ra</sup> edición. México: Limusa.

Maupoey P. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

McCabe W., Smith J., Harriott P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* 7<sup>ma</sup> edición. España: Mc Graw-Hill.

Perry R., Chilton C. (2001). *Manual del ingeniero químico*. 7<sup>ma</sup> edición. Barcelona, España: Gustavo Gil.

Ress J., Bettison J. (1991). *Proceso térmico y envasado de alimento*. España: Acribia, S.A.

Sinnott R. (2012). *Diseño en ingeniería química*. España: Reverté, S.A.

Smith J., Van Ness H., Abbott M. (2007) *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. 7<sup>ta</sup> edición. Barcelona, España: Mc Graw-Hill.

## TRABAJOS DE GRADO

Achandi G. (2008). *Secado de grano de elote crudo utilizando un lecho fluidizado al vacío, empleando aire.* (Tesis profesional). Universidad de las Américas Puebla. México.

Barreira V. (2007). *Estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado.* (Proyecto fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, España.

Carrasco D. (2015). *Propuesta para el uso de tipos de secado de cacao con su incidencia en la calidad de los granos.* (Trabajo de grado para maestría). Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. República Dominicana.

González M. (2015). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un secador tipo batch de lecho fluidizado para el laboratorio de operaciones unitaria.* (Trabajo de grado). Escuela superior politécnica de litoral Guayaquil. Ecuador.

Martínez C., Vizcarra M., Ruiz R. (1996). *Comparación entre los modelos de dos fase y mezclado perfecto para el secado de maíz en lecho fluidizado.* Avances en ingeniería Química N<sup>o</sup>. México.

Tirado M., Meléndez R. (1991). *Diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado para los laboratorio de operaciones unitarias.* (Trabajo de grado). Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. Santo domingo, República Dominicana.

Urrutia R. (2006). *Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para biomasa forestal*. (Trabajo de grado). Universidad Austral de Chile. Chile.

## ARTÍCULOS Y PUBLICACIONES

Arnaldo J., Kozanoglu B., Casal J. (1998). *Fluidización al vacío: aplicación al secado*. (Estudio experimental) en “actas de la IX Conferencia Internacional de Fluidización”. Eds., Durango, Co.

FAO.2019. *Materiales para la capacitación en semillas-Modulo 6: Almacenamiento de semillas*. Roma.

Geldart D. (1973) *Tecnología de Fluidización de Gas*. (Investigación). Ed. John Wiley & Sons, Gran Bretaña. pp.4, 5, 17, 127,128.

Kozanoglu B. (2003). *Proceso de secado en un lecho fluidizado al vacío con presión variable*. (Estudio experimental). Segunda conferencia internacional sobre transferencia de calor, mecánica de fluidos y termodinámica. HEFAT.

Kozanoglu B., Welte C., García C., Santos J. (2002). *Hidrodinámica de la fluidización de partículas grandes en operaciones de presión reducida*. (Estudio experimental). Tecnología de polvo 125. pp. 55-60.

Llop M. (1996). *Fluidización en condiciones de vacío, una ecuación generalizada para la predicción de la velocidad mínima de fluidización*. Chemical Engineering Science. Vol. 51, no, 23, págs. 5149-5157.

Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-2009. *Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico*. Bienes y servicios.

PennState Extension. (2018). *Norma de Inocuidad de los Productos Agrícolas Frescos*.

Thomas P, Varma B. (1992). *Secado en lecho fluidizado de materiales alimenticios granulares*. Power Technology. Vol. 69, pp. 213-222.

## PÁGINAS WEB

Banco mundial (abril, 2013). *Agricultura en el República Dominicana: Muy vulnerable, poco asegurada*. Recuperado de:

<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/04/26/Agricultura-Republica-Dominicana-desastres-naturales>.

Periódico El Día (abril, 2014). *SUNCUE, empresa líder en el mercado de los granos se establece en Rep. Dom.* Recuperado de: <https://eldia.com.do/suncue-empresa-lider-en-secado-de-granos-se-establece-en-rd/>.

Periódico El Dinero (septiembre, 2018). *Tecnología aplicada en Rep. Dom., mejora competitividad en arroz y cebolla*. Recuperado de: <https://www.eldinero.com.do/68032/tecnologia-aplicada-en-rd-mejora-competitividad-en-arroz-y-cebolla/>.

Revista Agrosíntesis (junio, 2016). *Humedad del grano de maíz y su importancia en la comercialización*. Recuperado de: <https://www.agrosintesis.com/humedad-del-grano-del-maiz-importancia-la-comercializacion/#.Xd3gcehKjIW>.

Weather atlas (abril, 2020). *Previsión meteorológica y clima mensual, Santo Domingo, República Dominicana*. Recuperado de <https://www.weather-atlas.com/es/republica-dominicana/santo-domingo-clima>.

**SEXTA PARTE**

**ANEXOS**

**ANEXO I**

**SÍMBOLOS**

## ANEXO I SÍMBOLOS

- $A$  = Área del intercambiador de calor ( $m^2$ ).
- $A_p$  = Superficie de contacto gas – partículas ( $m^2$ ).
- $A_T$  = Área total de la campana ( $m^2$ ).
- $C_p$  = Calor específico del aire ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ).
- $c_p$  = Concentración de humedad del gas en la superficie de la partícula ( $kg/m^3$ ).
- $c_v$  = Concentración de humedad en el gas ( $kg/m^3$ ).
- $D_p$  = Diámetro de la partícula (m).
- $g$  = Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ ).
- $h_{gp}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).
- $k_{gp}$  = Coeficiente de transferencia de masa superficial gas – partículas ( $m/s$ ).
- $L$  = Altura del lecho (m).
- $M_{db}$  = Humedad en base seca ( $kg$  de agua/ $kg$  prod. seco).
- $M_{wb}$  = Humedad en base húmeda ( $kg$  de agua/ $kg$  prod. húmedo).
- $\dot{m}$  = Velocidad másica del aire ( $kg/s$ ).
- $P_A$  = Potencia entregada por el ventilador (W).
- $P_B$  = Potencia recibida por el eje del ventilador (W).
- $p_d$  = Presión dinámica (mmcda).
- $p_e$  = Presión estática (mmcda).
- $P_t$  = Presión total (mmc

· $Q =$  Caudal de aire volumetrico ( $m^3/s$ ).

· $\dot{Q}_{gp} =$  Calor transferido ( $W$ ).

· $Q_T =$  Calor necesario ( $W$ ).

· $R =$  Velocidad de secado ( $kg$  de agua/ $m^2 \cdot min$ ).

· $r =$  radio ( $m$ ).

· $S_p =$  Área de la superficie de una sola partícula ( $m^2$ ).

· $T =$  Temperarura ( $^{\circ}C$ ).

· $T_g =$  Temperetura del fluido ( $^{\circ}C$ ).

· $T_p =$  Temperatura superficial de la particula ( $^{\circ}C$ ).

· $U =$  Coeficiente de trasferencia de calor ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ).

· $v =$  Velocidad lineal del aire ( $m/s$ ).

· $v_p =$  Volumen de una sola partícula ( $m^3$ ).

· $x_i =$  Fracción másica de partícula del diámetro  $D_p$ .

· $\bar{V}_{OM} =$  Velocidad mínima de fluidización ( $m/s$ ).

· $V_o =$  Velocidad de operación en el lecho ( $m/s$ ).

· $W_d =$  Peso de la materia seca en el producto ( $kg$ ).

· $W_o =$  Peso inicial de la materia sin secar ( $kg$ ).

· $W_s =$  Peso del sólido seco ( $kg$ ).

· $W_w =$  Cantidad de agua en el producto húmedo ( $kg$ ).

### Letras griegas

· $\Delta p =$  Caída de presión ( $kg/s^2 \cdot m^2$ ).

· $\Delta T =$  Diferencial de temperatura entre la entrada y salida del aire ( $^{\circ}C$ ).

· $\varepsilon$  = Porosidad o fracción de volumen de huecos en un lecho de sólidos.

· $\varepsilon_M$  = Porosidad mínima de fluidización.

· $\eta$  = Rendimiento.

· $\rho$  = Densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

· $\rho_p$  = Densidad de partícula ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

· $\Phi_s$  = Esfereicidad de la partícula.

· $\Omega$  = ohmios ( $\Omega$ ).

**ANEXO II**

**TABLAS**

## ANEXO II TABLAS

**TABLA 1.**

### **PÉRDIDA DE PESO EN EL SECADOR**

<b>Peso cápsula (kg)</b>	<b>0</b>
<b><math>W_o</math> (kg)</b>	<b>1.15E-01</b>
<b>Peso cápsula+<math>W_o</math> (kg)</b>	<b>1.15E-01</b>
<b>Peso cápsula+<math>W_s</math> (kg)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1.15E-01	0
8.50E-02	20
5.67E-02	40
5.67E-02	60
5.67E-02	80
5.67E-02	100
5.67E-02	120

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**TABLA 2.**

**PÉRDIDA DE HUMEDAD EN EL SECADOR**

<b>Peso cápsula (kg)</b>	0			
<b>W<sub>o</sub> (kg)</b>	1.15E-01			
<b>Peso cápsula+W<sub>o</sub> (kg)</b>	1.15E-01			
<b>Peso cápsula+W<sub>s</sub> (kg)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>W<sub>d</sub> (kg)</b>	<b>W<sub>w</sub> (kg)</b>	<b>M<sub>db</sub></b>
0	0	0	0	5.00E+00
8.50E-02	20	2.83E-02	8.50E-02	3.00E+00
5.67E-02	40	5.67E-02	5.67E-02	1.00E+00
5.67E-02	60	5.67E-02	5.67E-02	1.00E+00
5.67E-02	80	5.67E-02	5.67E-02	1.00E+00
5.67E-02	100	5.67E-02	5.67E-02	1.00E+00
5.67E-02	120	5.67E-02	5.67E-02	1.00E+00

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**TABLA 3.**

**VELOCIDAD DE SECADO EN EL SECADOR**

<b>W<sub>s</sub> (kg)</b>	<b>A<sub>p</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Δt (min)</b>	<b>ΔX (kg)</b>	<b>R (kg/m·°C)</b>
0	0	0	0	0
3.00E+00	0.10	20	8.50E-02	0.12
1.00E+00	0.10	20	5.67E-02	0.028

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**TABLA 4.**  
**PARAMETROS ELÉCTRICOS**

Date	Time	Kw	kVA	kVAR	PF	DPF	kWh	Hz
7/16/2020	13:36:49	2.47511	2.47911	0.18201	0.99838	0.99728	0.00413	60.04082
7/16/2020	13:37:19	2.4761	2.4801	0.18201	0.99837	0.99728	0.02476	59.97595
7/16/2020	13:37:50	2.47112	2.47511	0.181	0.99837	0.99728	0.04605	60.04082
7/16/2020	13:38:20	2.4691	2.47311	0.181	0.99838	0.99728	0.06663	59.91109
7/16/2020	13:38:49	2.47311	2.47711	0.18201	0.99838	0.99728	0.08655	59.91109
7/16/2020	13:39:19	2.47411	2.4781	0.18201	0.99838	0.99728	0.10717	59.91109
7/16/2020	13:39:49	2.47311	2.47711	0.181	0.99838	0.99728	0.12778	59.91109
7/16/2020	13:40:20	2.47411	2.4781	0.18201	0.99838	0.99728	0.14908	59.91109
7/16/2020	13:40:49	2.47711	2.48111	0.18201	0.9984	0.99728	0.16903	59.97595
7/16/2020	13:41:19	2.47511	2.47911	0.18201	0.99837	0.99728	0.18966	60.04082
7/16/2020	13:41:50	2.46811	2.47211	0.181	0.99837	0.99728	0.21092	60.04082
7/16/2020	13:42:19	2.47112	2.47511	0.181	0.99837	0.99728	0.23082	60.04082
7/16/2020	13:42:50	2.47112	2.47511	0.181	0.99838	0.99728	0.2521	59.97595
7/16/2020	13:43:20	2.47211	2.4761	0.18201	0.99837	0.99728	0.27271	59.97595
7/16/2020	13:43:49	2.47511	2.47911	0.18201	0.99838	0.99728	0.29264	60.04082
7/16/2020	13:44:19	2.47411	2.4781	0.18201	0.99838	0.99728	0.31326	60.04082
7/16/2020	13:44:49	2.4761	2.4801	0.18201	0.99838	0.99728	0.33389	59.97595
7/16/2020	13:45:19	2.46811	2.47211	0.181	0.99837	0.99728	0.35446	59.97595

<b>LEYENDA</b>	
<b>kW</b>	Potencia Activa
<b>kVA</b>	Potencia Aparente
<b>kVAR</b>	Potencia Reactiva
<b>PF</b>	Factor de Potencia
<b>kWh</b>	Consumo Energético evaluado cada 30 segundos
<b>Hz</b>	Frecuencia

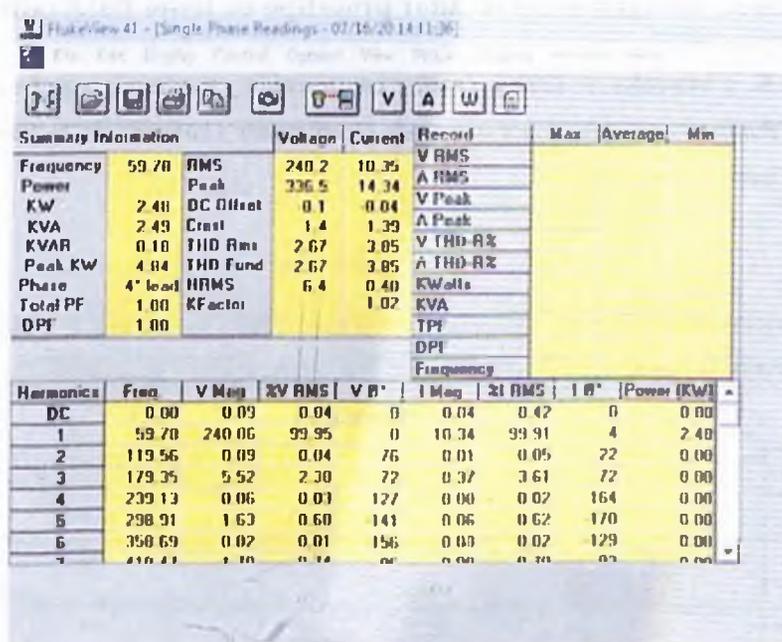
Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña*

**ANEXO III**

**GRÁFICAS ELÉCTRICAS**

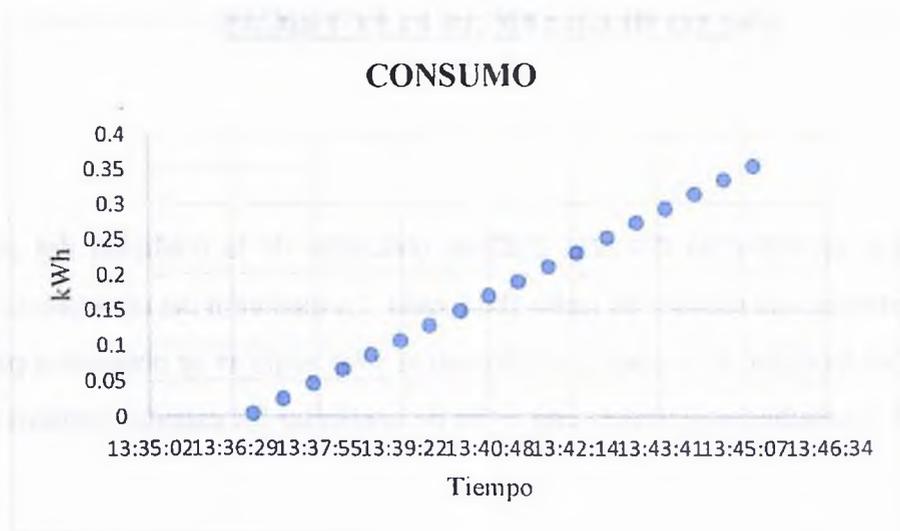
## ANEXO III GRÁFICAS ELÉCTRICAS

A continuación se muestran distintas gráficas obtenidas de la medición del consumo energético del prototipo de secador de lecho fluidizado. La medición del consumo se realiza con un dispositivo medidor de corriente (wattmetro) y las gráficas se obtienen a partir del software fluke. Esta medición se realiza con el fin de confirmar los cálculos teóricos con los prácticos.



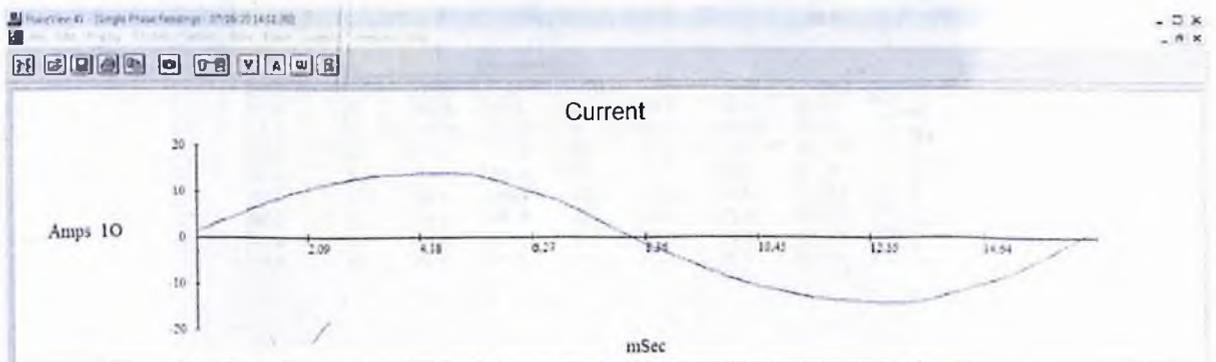
**Gráfica 1. Software Fluke**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



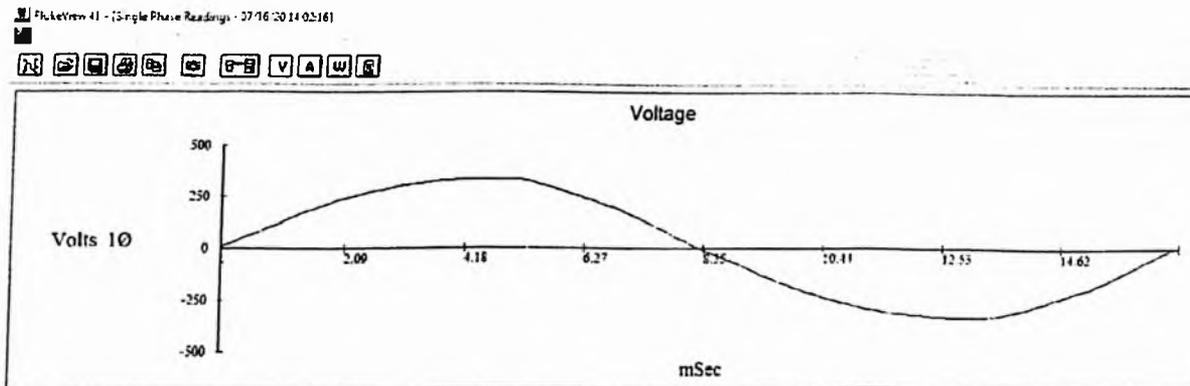
**Gráfica 2. Consumo energético del secador prototipo de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



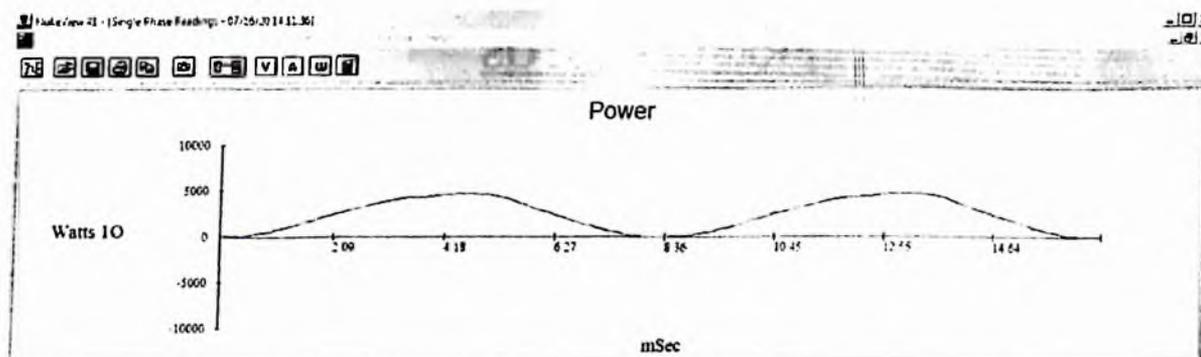
**Gráfica 3. Corriente vs tiempo**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Gráfica 4. Voltaje vs tiempo**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Gráfica 5. Watts vs tiempo**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**ANEXO IV**

**PRESUPUESTOS**

## ANEXO IV PRESUPUESTOS

### PRESUPUESTO 1.

#### RECURSOS MATERIALES

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (DOP)	TOTAL
MOTOR	1	1,500	1,500
CAPACITOR	1	250	250
RESISTENCIAS (PRUEBA 1)	4	375	1,500
TUBERIAS PARA SOPORTES (PRUEBA 1)	1	1,300	1,300
TUBERIA DE 4 PULGADAS	1	3,000	3,000
SPRAY GALVANIZADO	1	230	230
CEPILLO DE HIERRO	1	400	400
LAMINAS DE HIERRO GALVANIZADAS	4	100	400
COUPLING DE 4 PULGADAS	1	400	400
CABLES ELÉCTRICOS	1	1,000	1,000
CUBA	1	5,000	5,000
RIEL	1	800	800
UNIÓN UNIVERSAL PARA RIELES	8	75	600
MALLA METÁLICA	1	700	700
TAPONES DE 1/2 PULGADAS	4	75	300
RUEDAS METÁLICAS	5	150	750
RESISTENCIA DE REPUESTO ( PRUEBA 2)	1	200	200
RESISTENCIAS DE REPUESTO (PRUEBA 3)	2	200	400
ADHESIVOS	3	250	750
RESISTENCIAS DE REPUESTO (PRUEBA 4)	2	100	200
SENSOR DE TEMPERATURA	1	2,000	2,000
SENSOR DE TEMPERATURA REPUESTO ( PRUEBA 2)	1	400	400
TEMPORIZADOR	2	2,000	4,000
MATERIALES VARIOS	1	1,700	2,000
COMBUSTIBLE	1	2,000	2,000
		<b>TOTAL GASTADO</b>	<b>30,080</b>

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

## PRESUPUESTO 2.

### RECURSOS HUMANOS

TRABAJOS	MANO DE OBRA	TOTAL (DOP)
ENSAMBLAJE DE TOLA GALVANIZADA	CIPRIAN REFRIGERACIÓN	800
ENSAMBLAJE DE CIRCUITO ELÉCTRICO	VEGSAING	1,000
ADAPTACIÓN DE CUBA DE ACERO INOXIDABLE	VEGSAING	1,000
SOLDADURA DE RUEDAS	CIRO	800
ADAPTACIÓN DE LA CURVA	CIRO	1,000
ADAPTACIÓN DE RUEDA DELANTERA	CIRO	500
CORTES DE RIEL	CIPRIAN REFRIGERACIÓN	400
	<b>TOTAL GASTADO</b>	<b>5,500</b>

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

## PRESUPUESTO 3.

### RECURSOS TOTALES

CONCEPTOS	TOTAL (DOP)
RECURSOS MATERIALES	30,080
RECURSOS HUMANOS	5,500
<b>TOTAL GASTADO</b>	<b>35,580</b>

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**ANEXO V**

**EQUIPOS Y MATERIALES QUE SE USAN EN EL PROCESO  
DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA.**

## ANEXO V EQUIPOS Y MATERIALES



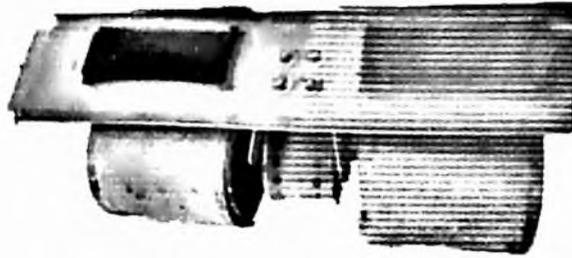
**Fig. 1. Materiales para la determinación de humedad del maíz**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 2. Calibrador electrónico digital**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



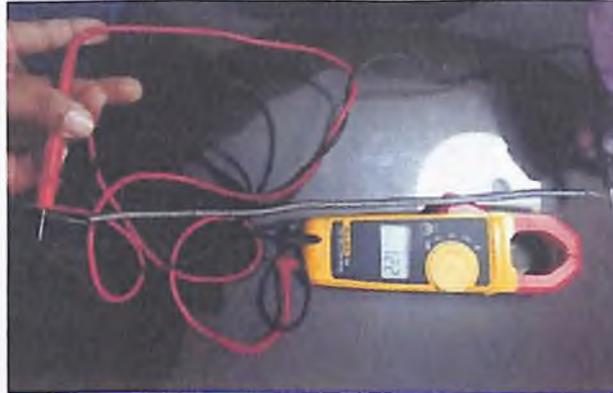
**Fig. 3. Ventilador reciclado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 4. Recipiente cilíndrico reciclado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 5. Resistencia eléctrica**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 6. Medidor del consumo energético**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



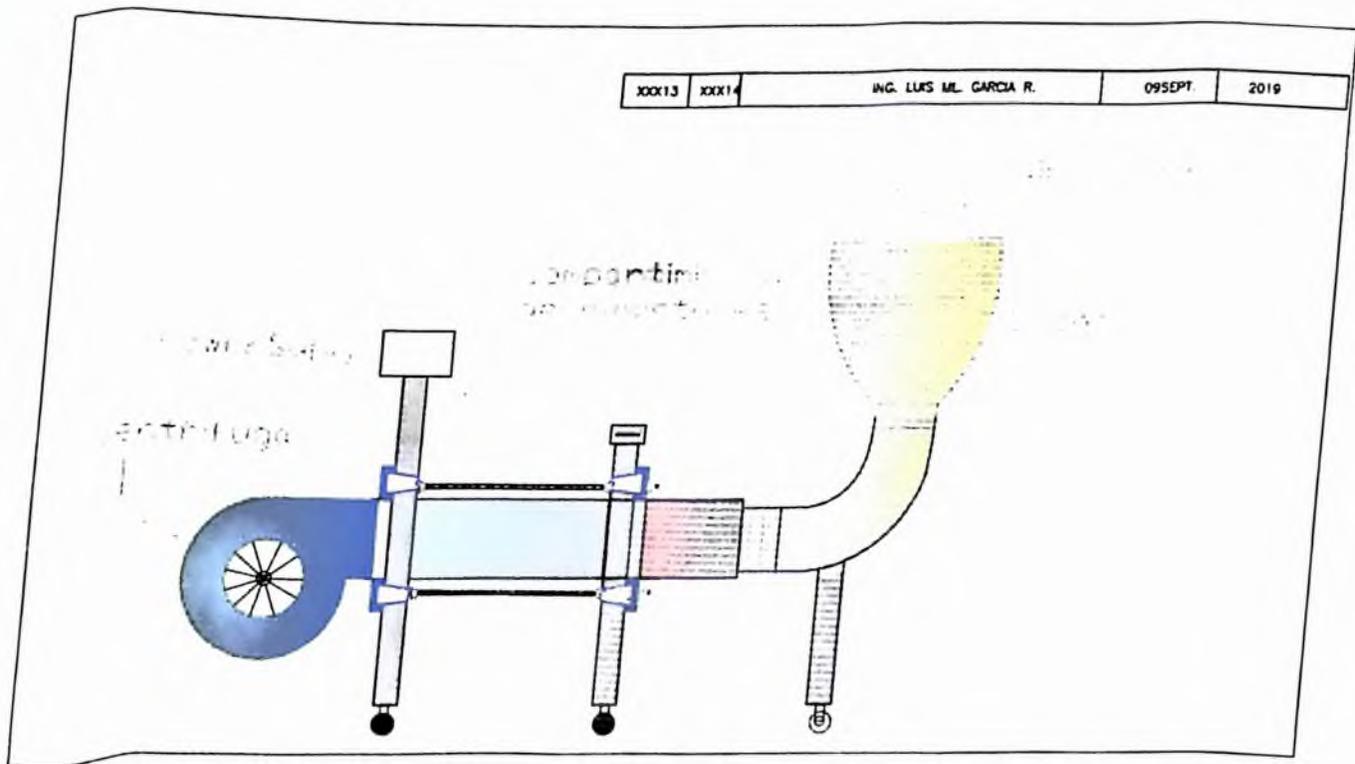
**Fig. 7. Prototipo en cartón del secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**ANEXO VI**

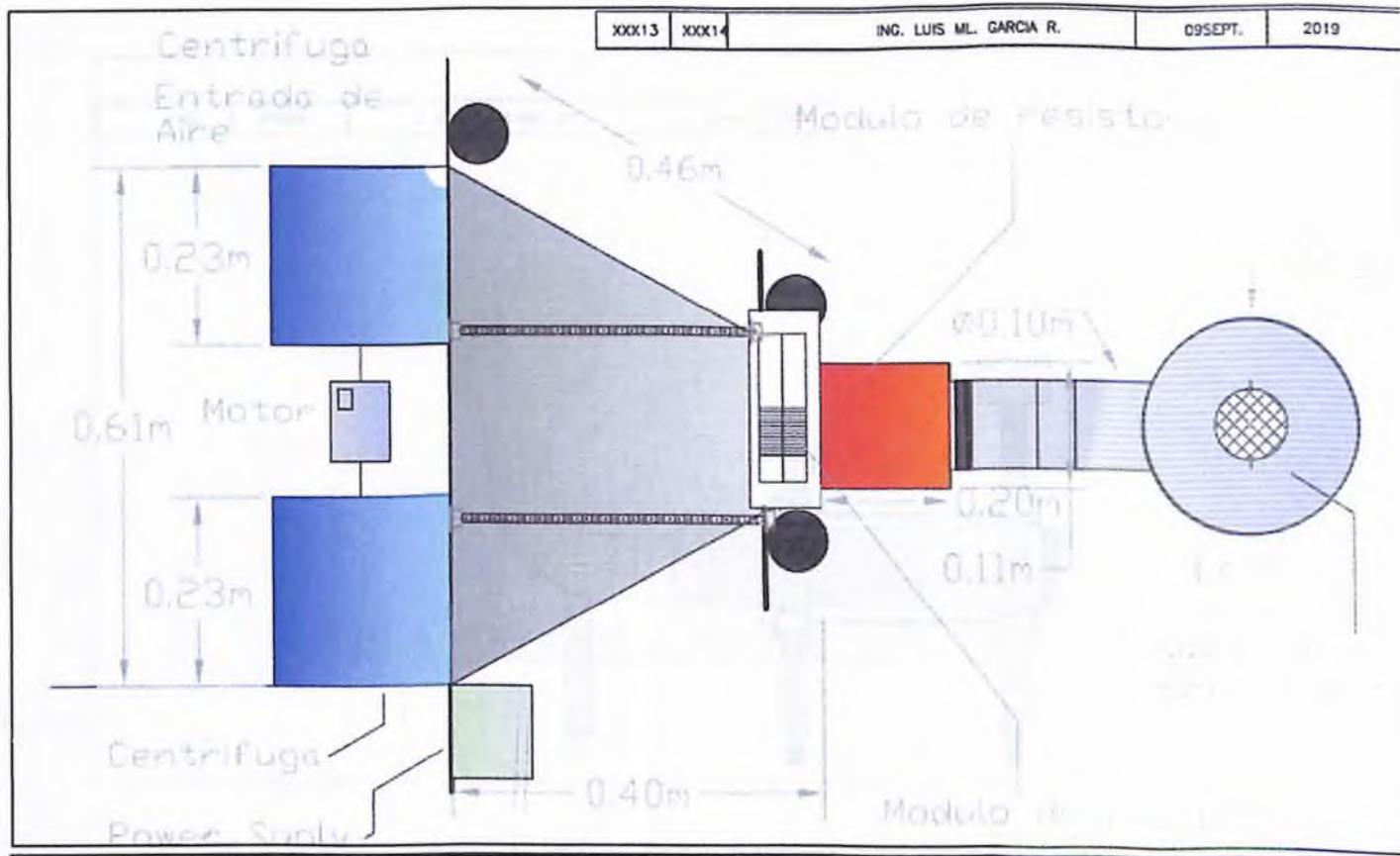
**PLANOS Y DIAGRAMAS DEL EQUIPO**

## ANEXO VI PLANOS Y DIAGRAMAS DEL EQUIPO



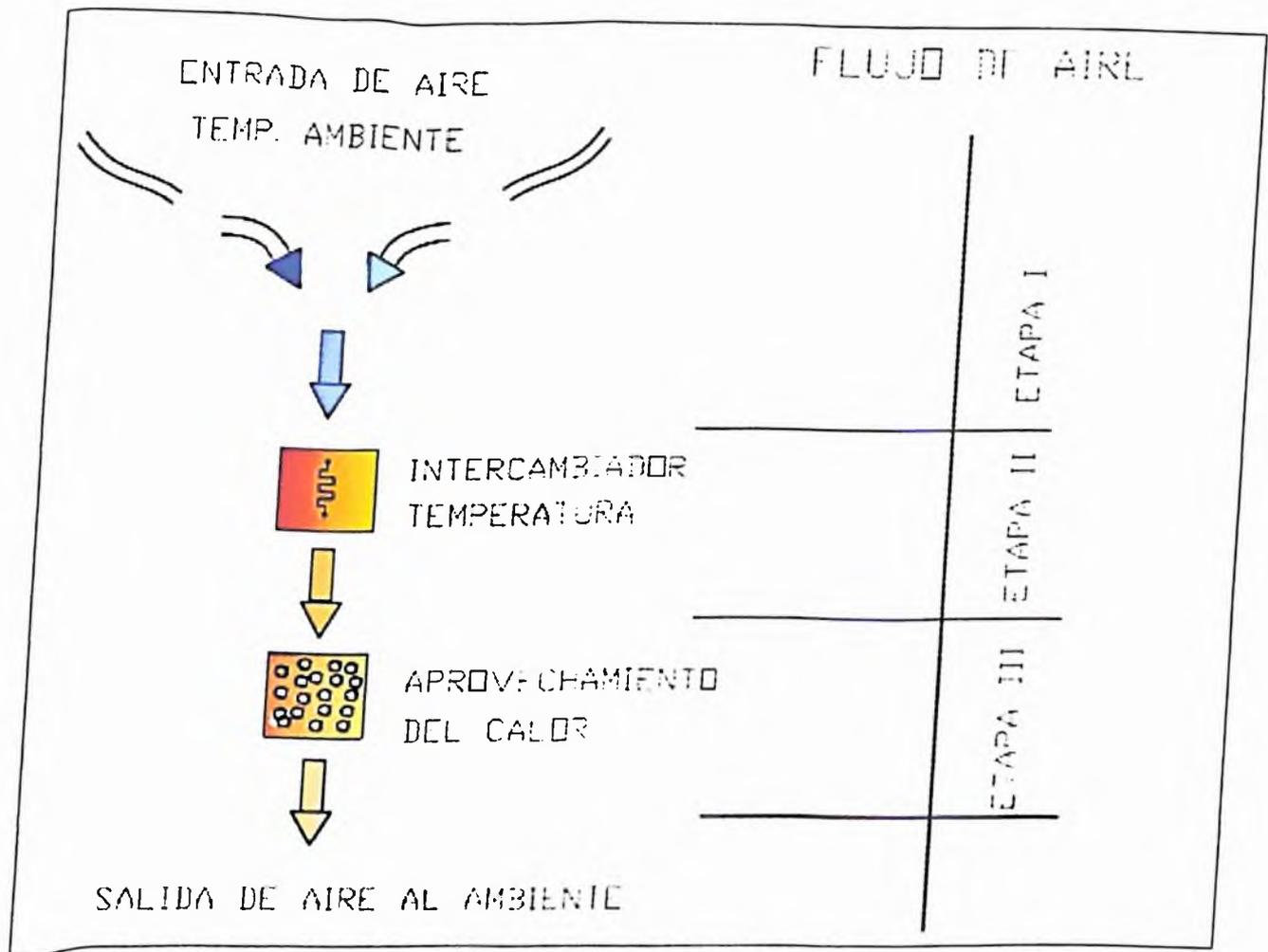
**Fig. 8. Vista lateral del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



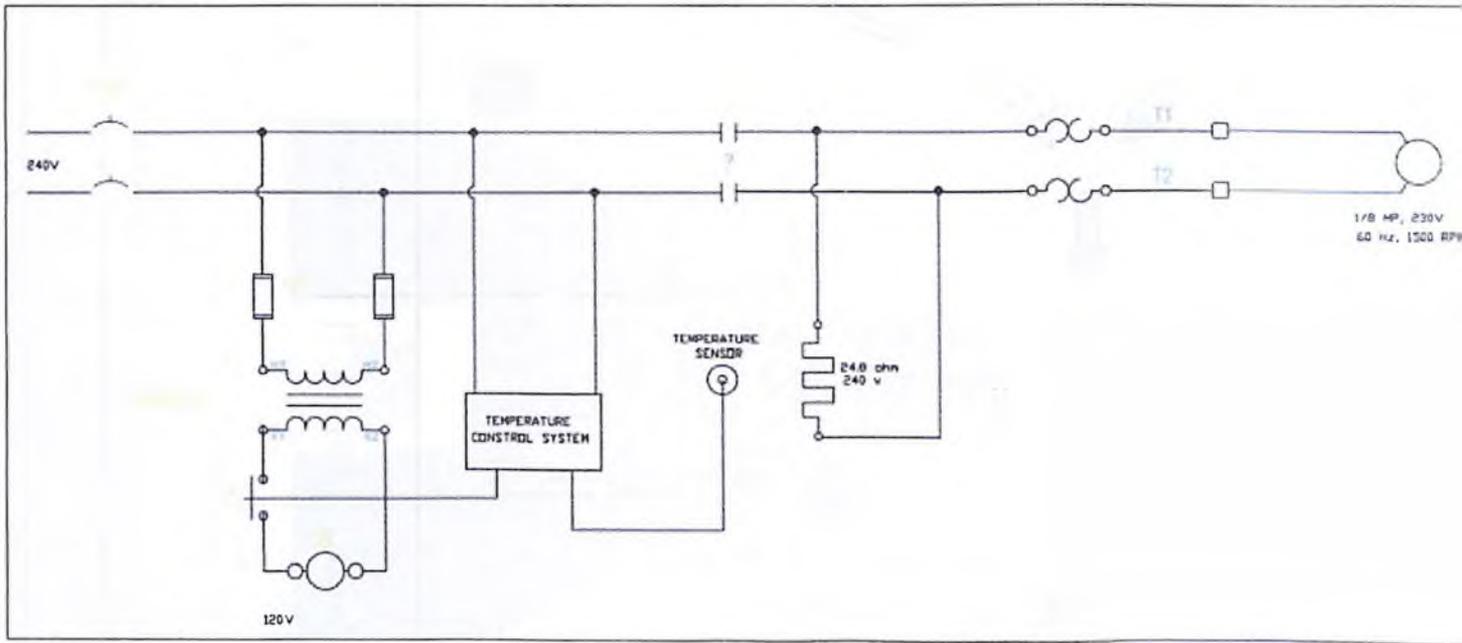
**Fig. 9. Vista superior del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 10. Diagrama flujo del aire del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 11. Diagrama eléctrico del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**ANEXO VII**

**CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO**

## ANEXO VII CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO



**Fig. 12. Vista lateral del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



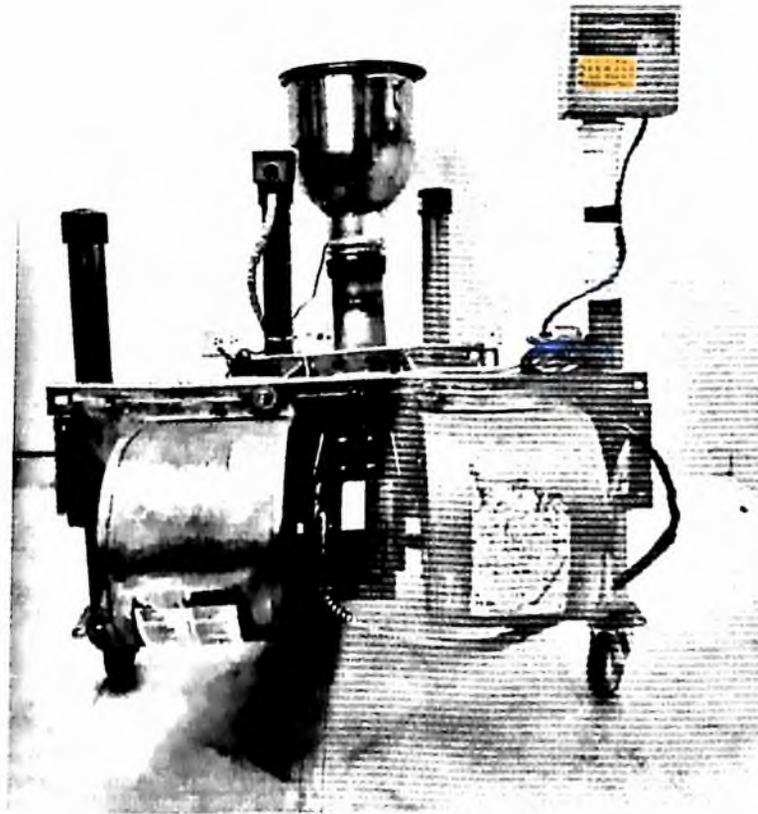
**Fig. 13. Vista superior del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 14. Vista frontal del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 15. Vista posterior del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*



**Fig. 16. Perspectiva del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Fuente: García K. y Mercedes Y. (2020). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador de lecho fluidizado para los laboratorios de Operaciones Unitarias de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.*

**ANEXO VIII**

**MANUAL DE PRÁCTICA**

## ANEXO VIII MANUAL DE PRÁCTICA

### MANUAL DE PRÁCTICA EN EL PROTOTIPO DE SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO

#### ÍNDICE

GENERALIDADES.....	135
I.1. Introducción.....	135
I.2. Alcance.....	136
I.3. Responsables.....	136
I.4. Equipos de protección personal (EPP).....	136
PROCEDIMIENTOS.....	137
II.1. Materiales y equipos.....	137
II.2. Operación.....	137
II.3. Datos y cálculos.....	138
RECOMENDACIONES.....	138

## **I. GENERALIDADES**

### **I.1. Introducción**

Un secador de lecho fluidizado es un equipo que trabaja bajo el principio de fluidización, y se utiliza para el secado rápido de sólidos granulares por medio del contacto directo entre el aire caliente y el sólido. En esta operación la transferencia de calor y masa son muy rápidas.

El prototipo de secador de lecho fluidizado es un dispositivo de secado, que actúa bajo el mismo principio de fluidización y tiene como función principal el secado de alimentos en granos. El aire a presión entra a través del ventilador, que es una cámara cerrada de tola galvanizada y se conecta con el sistema de calentamiento de aire donde ocurre el aumento de temperatura, luego el aire caliente entra al lecho de fluidización donde se encuentran los granos que conforman el lecho, y por transferencia de calor y masa ocurre el proceso de secado.

### **Capacidad del prototipo de secador de lecho fluidizado**

Considerando que el equipo es para uso de prácticas en el laboratorio, la capacidad máxima se fija en un rango de 100-150 g y se limita a trabajar con partículas del grupo D según la clasificación Geldart, como ejemplo:

- Granos Arroz
- Granos de Maíz
- Granos de Café
- Trigo
- Avena
- Semillas de ahuyama
- Semillas de girasol

## I.2. Alcance

- El equipo es para uso exclusivo de prácticas.

## I.3. Responsables

El prototipo de secador de lecho fluidizado pertenece única y exclusivamente al laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química, perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

## I.4. Equipos de protección personal (EPP)

Equipos de Protección Personal (EPP), se deben utilizar para proteger al estudiante de los riesgos presentes en el área de trabajo, esto va en función al tipo de riesgo al que se está expuesto durante la realización de la práctica.

Zona de cuerpo	E.P.P.	Principales Riesgos	Imagen
Extremidades	Guantes dieléctricos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Quemaduras por exposición a objetos calientes.</li><li>• Contacto de tipo eléctrico.</li></ul>	
Extremidades	Botas dieléctricas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Caída</li><li>• Contacto de tipo eléctrico</li></ul>	
Pecho y Extremidades	Bata de laboratorio	<ul style="list-style-type: none"><li>• Contacto con objetos calientes.</li></ul>	
Ojos	Lentes de seguridad	<ul style="list-style-type: none"><li>• Exposición a partículas pequeñas.</li></ul>	

## **II. PROCEDIMIENTOS**

Para operar el prototipo de secador de lecho fluidizado se requiere seguir el procedimiento que se detalla a continuación.

### **II.1. Materiales y equipo**

- Prototipo de secador de lecho fluidizado
- Granos a secar
- Envase
- DeseCADOR
- Balanza analítica

### **II.2. Operación**

- Obtener el peso del envase y registrar su valor.
- Pesar de 100-150 g de la muestra e introducirlo en el secador asegurándose que se coloquen dentro del distribuidor y colocar la tapa.
- Conectar el equipo a una línea de 220 V y encender en el botón ON/OFF, esperar que la pantalla muestre la temperatura ambiente.
- Colocar en el temporizador los minutos de secado 10 min.
- Retirar la muestra e introducirla en el desecador hasta temperatura ambiente, pesarla y registrar su valor. Repetir hasta peso constante.
- Calcular el porcentaje de humedad de la muestra en base seca y con los datos obtenidos construir la curva de pérdida de peso y humedad.

### II.3. Datos y Cálculos

#### Datos:

- Peso del envase ( $P_i$ ):
- Peso de la muestra sin secar ( $W_o$ ):
- Peso del envase + muestra sin secar ( $P_i+W_o$ ):
- Peso del envase + muestra después de secar ( $P_i+W_s$ ):

#### Cálculos:

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_o - W_d}{W_d}$$

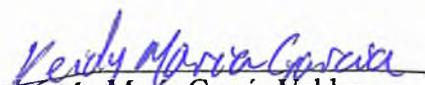
#### Dónde:

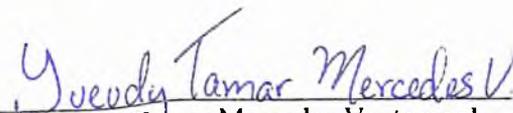
- $M_{db}$ : Humedad en base seca (kg de agua/kg de prod. seco).
- $W_d$ : Peso de la materia seca en el producto ( $P_i+W_o$ ) – ( $P_i+W_s$ ).

### II.3. RECOMENDACIONES

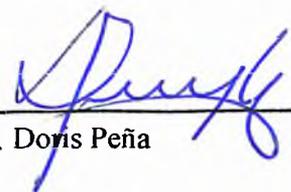
- Se recomienda mantener el prototipo de secador de lecho fluidizado operando en un lugar con ventilación para evitar sobrecalentamiento del motor.
- No es recomendable sobrepasar los parámetros de diseño y funcionamiento durante el proceso de secado, ya que puede ocasionar el deterioro en las propiedades del producto y funcionamiento de equipo.
- Es recomendable seguir el manual de operación del prototipo de secador de lecho fluidizado y mantener en perfecto estado el sistema, para evitar fugas de calor por golpes o hendiduras.

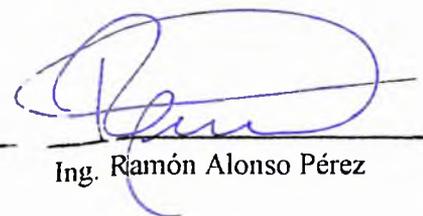
**SUSTENTANTES**

  
Keidy María García Valdez

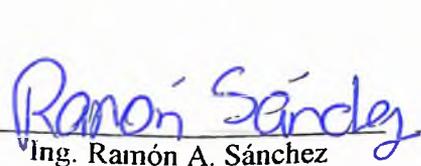
  
Yugeudy Tamar Mercedes Vanterpool

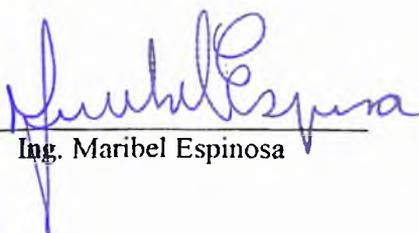
**ASESORES**

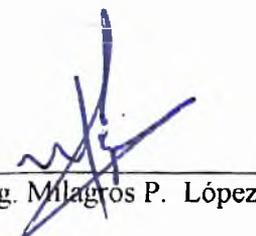
  
Ing. Doris Peña

  
Ing. Ramón Alonso Pérez

**JURADOS**

  
Ing. Ramón A. Sánchez

  
Ing. Maribel Espinosa

  
Ing. Milagros P. López

Calificación: 91 (A)

Fecha: 19/08/2020

  
Ing. Doris Peña  
ESCUELA DE QUÍMICA  
Directora Escuela de Química

