

DESARROLLO DE UNA TECNOLOGIA ESCALA DE BANCO PARA EL SECADO  
DE CRUDO DE ALMIDÓN NATIVO DE QUINUA

CARLOS FELIPE BORRAEZ JIMENEZ  
NICOLAS MEJIA GALVIS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE MECANICA  
BOGOTÁ D.C.  
2016

DESARROLLO DE UNA TECNOLOGIA ESCALA DE BANCO PARA EL SECADO  
DE CRUDO DE ALMIDÓN NATIVO DE QUINUA

CARLOS FELIPE BORRAEZ JIMENEZ  
NICOLAS MEJIA GALVIS

Proyecto Integral de Grado para optar el título de  
INGENIERO MECÁNICO

Director  
JHON FREDDY OCHOA AVENDAÑO  
Ingeniero Mecánico

Co-director  
CLAUDIO RAUL BERNAL BUSTOS  
Estudiante de doctorado (ED)

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.  
2016

Aceptación (Dirección de Investigaciones)

---

---

---

---

---

---

---

Firma Docente Investigador

---

Firma Docente Jurado 1

---

Firma Docente Jurado 2

Bogotá D.C., Agosto de 2016

## **DIRECTIVAS UNIVERSIDAD AMÉRICA**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Secretario General

**Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA –PEÑA**

Decano General Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director de Investigaciones

**Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CARDENAS**

Director Programa Ingeniería Mecánica

**Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestro director, el ingeniero **Jhon Freddy Ochoa Avendaño**, por la confianza depositada en nuestras capacidades para llevar a cabo este proyecto; queremos agradecer su ayuda, paciencia y dedicación durante el desarrollo del mismo.

A todas las personas que hicieron parte del desarrollo de este proyecto, gracias por su apoyo y acompañamiento en este proceso, especialmente a nuestras familias y amigos más cercanos.

Finalmente a la **Universidad de América**, por brindarnos las herramientas y la formación académica a lo largo de estos años, permitiéndonos crecer como personas y profesionales.

## **DEDICATORIA**

Agradezco a Dios por brindarme la salud y las fuerzas necesarias para culminar con esta etapa de mi vida que se cierra con la entrega de este documento. Agradezco a mi madre **Melida Jimenez** por entregarme su apoyo incondicional en el transcurso de toda mi vida y carrera como Ing Mecánico, por enseñarme valores los cuales me ayudaran a ser un excelente profesional y persona. Agradezco a las personas que hacen parte de mi vida y con las cuales puedo contar.

**Carlos Felipe Borraez Jiménez**

## DEDICATORIA

Les agradezco a mis padres **Gloria Galvis** y **Álvaro Mejía** por enseñarme el valor de la responsabilidad y el compromiso así como también brindarme las herramientas necesarias para el cumplimiento de mis estudios universitarios. Le agradezco a **Mélida Jiménez** por acogerme como un hijo en su hogar y brindarme su voz de apoyo y reflexión en los momentos necesarios. Finalmente le agradezco mi compañero y amigo **Felipe Borraez** con quien no solo he compartido etapas de mi crecimiento como persona sino también etapas de formación en las aulas de clase desde quinto de primaria y con quien tuve la oportunidad de desarrollar este proyecto de grado.

Dedico este proyecto a todos aquellos estudiantes quienes como yo han organizado su tiempo y prioridades para poder cumplir de manera responsable con sus estudios universitarios y al mismo tiempo construir una hoja de vida en el entorno laboral.

**Nicolás Mejía Galvis.**



## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES DEL ALMIDÓN DE QUINUA	22
1.2 CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE QUINUA	24
1.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL ALMIDÓN DETERMINANTES PARA LA ETAPA DE SECADO	26
2. GENERALIDADES DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE SECADO DE CRUDO DE ALMIDÓN	30
2.1 TECNOLOGÍAS DE SECADO DE MEZCLAS SOLIDO-LIQUIDO APLICABLES AL SECADO DE ALMIDONES.	30
2.1.1 Secado al sol	30
2.1.2 Secado en horno	31
2.1.3 Secado con tecnología flash Dryer	31
2.1.4 Secado en centrifuga de platos cónicos	32
2.1.5 Secado por medio de rodillos	33
2.1.6 Secado por atomización	34
2.2 DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	35
3. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE SECADO A ESCALA LABORATORIO	39
3.1 FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR	39
3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DEL EQUIPO	40
3.2.1 Sistema de atomización	41
3.2.3 Sistema de recuperación de producto	48
3.2.4 Sistema de distribución de aire caliente	50
3.2.5 Sistema de alimentación	52
3.3 BALANCE DE ENERGIA Y MASA EN UN SECADOR SPRAY DRYER	53
3.4 DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS	56
3.4.1 Atomizador	57
3.4.2 Cámara de secado	59
3.4.3 Ciclón	62

4. HOJA DE CÁLCULO Y ESQUEMAS	65
4.1 Diseño de un secador spray	65
4.2 Balance flujo co-corriente	68
4.4 Cámara de secado	71
5.CONCLUSIONES	72
6.RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74

## LISTA DE CUADROS

	pág.
<b>Cuadro 1.</b> Tecnologías aplicables para secado de almidón de quinua.	36
<b>Cuadro 2.</b> Valor de cada parámetro de selección.	37
<b>Cuadro 3.</b> Evaluación de parámetros.	37
<b>Cuadro 4.</b> Puntaje de parámetros de cada tecnología.	38
<b>Cuadro 5.</b> Dispositivos comúnmente utilizados en la atomización.	43
<b>Cuadro 6.</b> Patrones de atomización.	44
<b>Cuadro 7.</b> Nomenclatura Balance de Masa y Energía.	54
<b>Cuadro 8.</b> Parámetros para la elección del tiempo de secado.	60

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Balance de Masa.	55
<b>Ecuación 2.</b> Balance de energía.	55
<b>Ecuación 3.</b> Entalpía del aire.	55
<b>Ecuación 4.</b> Calor Húmedo.	56
<b>Ecuación 5.</b> Entalpía del crudo de almidón.	56
<b>Ecuación 6.</b> Calor cedido por la cámara.	56
<b>Ecuación 7.</b> Diámetro de la gota.	57
<b>Ecuación 8.</b> Desplazamiento horizontal máximo de la gota.	57
<b>Ecuación 9.</b> Velocidad Horizontal.	58
<b>Ecuación 10.</b> Número de Reynolds.	58
<b>Ecuación 11.</b> Velocidad tangencial.	58
<b>Ecuación 12.</b> Flujo volumétrico de aire de secado.	62
<b>Ecuación 13.</b> Área del ducto de entrada.	63
<b>Ecuación 14.</b> Diámetro del cuerpo.	63

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Comportamiento de gelatinización y retrogradación en los granos de almidón.	28
<b>Figura 2.</b> Sistema de secado de almidón agrio de yuca en rallanderías del cauca.	30
<b>Figura 3.</b> Partes principales de un horno.	31
<b>Figura 4.</b> Secador SEI-CONTRERAS ingeniería.	32
<b>Figura 5.</b> Etapas de operación de una Centrífuga de platos.	33
<b>Figura 6.</b> Diagrama de un secador de Rodillos.	34
<b>Figura 7.</b> Componentes de la tecnología spray dryer o secado por atomización.	34
<b>Figura 8.</b> Diagrama de secado por atomización.	40
<b>Figura 9.</b> Tipos de atomizadores rotatorios.	42
<b>Figura 10.</b> Atomizador de toberas neumáticas.	42
<b>Figura 11.</b> Ejemplos de sistemas de descarga. A, salida de aire; PS, producto seco.	46
<b>Figura 12.</b> Altura de la cámara de secado H vs diámetro de gota d; $\Delta t$ , diferencial de temperatura entre el aire de secado y la partícula.	47
<b>Figura 13.</b> Trayectorias de flujo dentro de la cámara de secado. A, flujo de aire; EM, entrada de material; P, producto seco; S, spray.	48
<b>Figura 14.</b> Trayectoria de aire-producto en el ciclón.	49
<b>Figura 15.</b> Eficiencia del ciclón vs tamaño de partícula.	50
<b>Figura 16.</b> Ventilador centrifugo.	51
<b>Figura 17.</b> Sistema de distribución de aire caliente.	51
<b>Figura 18.</b> Sistema de alimentación de producto.	52
<b>Figura 19.</b> Clasificación de bombas.	53
<b>Figura 20.</b> Balance de masa y energía en un secador spray dryer.	54
<b>Figura 21.</b> Análisis de trayectoria de la gota a la salida de un atomizador rotatorio.	59
<b>Figura 22.</b> Modelo de atomizador rotatorio.	59
<b>Figura 23.</b> Dimensiones de la cámara de secado.	61
<b>Figura 24.</b> Modelo de cámara de secado.	62
<b>Figura 25.</b> Dimensiones de un ciclón.	64
<b>Figura 26.</b> Modelo de ciclón.	64
<b>Figura 27.</b> Libro de cálculo.	66
<b>Figura 28.</b> Especificaciones del producto a secar.	67
<b>Figura 29.</b> Especificaciones del aire a secar.	67
<b>Figura 30.</b> Especificaciones del diseño de los equipos.	68
<b>Figura 31.</b> Especificaciones del balance de masa y energía.	69
<b>Figura 32.</b> Datos finales del balance de masa y energía.	70
<b>Figura 33.</b> Especificaciones de la gota.	70
<b>Figura 34.</b> Especificaciones de la cámara de secado.	71

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Variaciones de tamaño y peso de grano de variedades comerciales de quinua en Perú.	25
<b>Tabla 2.</b> Porcentaje de humedad, poder de hinchamiento e índice de solubilidad de 26 muestras de almidón de quinua.	26
<b>Tabla 3.</b> Temperatura de gelatinización de tres variedades de quinua.	29

## ABREVIATURAS

<b>II01UBU:</b>	Protocolo experimental que permite forzar un rompimiento del funículo, dejando un grano desmembrado-abierto.
<b>FPP1:</b>	Fracción primaria de crudo de almidón utilizada por Bernal Claudio en el proceso de extracción.
<b>FPP2:</b>	Fracción secundaria de crudo de almidón utilizada por Bernal Claudio en el proceso de extracción.
<b>NaOH:</b>	Hidróxido de sodio.
<b>°C:</b>	Grados Celsius (Medida de temperatura).
<b>TE 60-TR1050:</b>	Horno de cámara con circulación de aire empleado en el proceso experimental de extracción de almidón de Quinoa por Bernal Claudio.
<b>CEN-MKII-12:</b>	Molino de bolas empleado en el proceso experimental de extracción de almidón de Quinoa por Bernal Claudio.
<b>g:</b>	Gramos (Medida de masa).
<b>L:</b>	Litro (Medida de volumen).
<b>µm:</b>	Micrómetros (Medida de longitud).
<b>INIA 420:</b>	Especie de semilla de Quinoa con mayor contenido de almidón, de acuerdo a un estudio realizado por la FAO.
<b>FAO:</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
<b>msnm:</b>	Metros sobre el nivel del mar (Medida de longitud).
<b>mm:</b>	Milímetros (Medida de longitud).
<b>Kg:</b>	Kilogramo (Unidad de masa).
<b>TO:</b>	Tipo de operación.
<b>FC:</b>	Fuente de calor.
<b>MT:</b>	Medio de transferencia de calor.
<b>SP:</b>	Seguridad en el proceso.
<b>TT:</b>	Temperatura de trabajo.
<b>E:</b>	Eficiencia.
<b>m<sup>2</sup>:</b>	Metro cuadrado (Medida de área).
<b>rpm:</b>	Revoluciones por minuto (Medida de velocidad).
<b>Kpa:</b>	Kilopascal (Medida de energía).
<b>Khz:</b>	Kilohertz (Medida de energía).
<b>H:</b>	Altura de la cámara de secado.
<b>d:</b>	Diámetro de la gota.
<b>Δt:</b>	Diferencial de temperatura entre el aire de secado y la partícula.
<b>s:</b>	Segundo (Medida de tiempo).
<b>Kcal:</b>	Kilocaloría (Medida de Energía).
<b>h:</b>	Hora (Medida de tiempo).
<b>m<sup>3</sup>:</b>	Metro cúbico (Medida de volumen).
<b>rps:</b>	Revoluciones por minuto (Medida de velocidad).
<b>Pa:</b>	Pascal (Medida de presión).

**N:** Newton (Medida de fuerza).



## GLOSARIO

**AGUA DESIONIZADA:** es aquella sobre la cual se ha retirado sodio, calcio hierro, cobre y otros mediante un proceso de intercambio iónico.

**ALMIDÓN:** el almidón es una materia prima con un amplio campo de aplicaciones que van desde la impartición de textura y consistencia en alimentos hasta la manufactura de papel, adhesivos y empaques biodegradables.

**AMILOSA:** es un polisacárido lineal formado por unidades de glucosa.

**AMINOÁCIDOS:** es una molécula orgánica compuesta por dos grupos químicos.

**ATOMIZACIÓN:** proceso que consiste en la generación de gotas a partir de una sustancia en forma líquida, pasta o suspensión.

**CENTRIFUGADO:** equivale a la aplicación de una fuerza centrífuga comúnmente sobre materiales para lograr separación o secado.

**COEFICIENTE CONVECTIVO:** se refiere al coeficiente global de transferencia de calor en un medio convectivo.

**COMBUSTIÓN:** reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable.

**CONDUCCIÓN:** en procesos de transferencia de calor, se refiere a la transmisión de calor basada en el contacto directo entre los cuerpos.

**CONVECCIÓN:** en procesos de transferencia de calor, se refiere a la transmisión de calor por medio de un cuerpo en estado líquido o gaseoso.

**CRUDO DE ALMIDÓN:** nombre asignado por el grupo de investigación de la Fundación Universidad de América a la sustancia a la cual se extrae el almidón proveniente de la semilla de Quinoa.

**DISGREGAR:** operación o proceso de separación.

**GELATINIZACIÓN:** comportamiento no deseado del almidón en el que se ve modificada su estructura cristalina.

**GRASAS:** es un término genérico utilizado para designar varia clase de lípidos.

**LÍPIDOS:** son un conjunto de moléculas orgánicas compuestas por hidrógeno y carbono.

**MEZCLA:** es un material formado por dos o más componentes unidos, aunque no son combinados químicamente, es decir no forman enlaces entre sí.

**MOLIENDA HÚMEDA:** operación o proceso en el que se aplica una sustancia líquida comúnmente agua para el desmenuzamiento de materia sólida facilitando así su desmenuzamiento.

**MOLIENDA SECA:** operación o proceso que consiste en desmenuzar una materia sólida.

**PODER CALORÍFICO:** cantidad de energía que la unidad de masa puede desprender al producirse una reacción química.

**POLIETILENO:** es un tipo de polímero que se utiliza en la fabricación de envases, recipientes, bolsas, entre otros.

**PROTEÍNAS:** macromoléculas compuestas por nitrógeno, oxígeno y carbono, formadas por la unión de varios aminoácidos.

**QUINUA:** es un pseudocereal cultivado principalmente en la cordillera de los Andes, en 2013 fue catalogado por la FAO como el grano de la humanidad, fuente promisorio de proteínas, lípidos y aminoácidos.

**SAPONINAS:** son un grupo de glucósidos solubles en agua los cuales pueden producir espuma en procesos de agitación, así como también no son deseados en alimentos ya que pueden llegar a amargarlos.

**SOBRENADANTE:** es un término genérico utilizado para indicar una capa de material flotante sobre una sustancia líquida, en el caso del crudo de almidón se refiere a las grasas, lípidos, aminoácidos y proteínas que flotan luego de la reacción química para la separación del almidón.

**SODIO BORATO:** polvo cristalino blanco que presenta una leve acción antiséptica.

**SOLVENTE:** se refiere a sustancias orgánicas en estado líquido utilizadas para disolver sólidos, gases u otros líquidos.

## RESUMEN

El grupo de bioprospección e ingeniería química aplicada al estudio de biomoléculas e industria de la Fundación Universidad de América en su línea de investigación de almidones funcionalizados, trabaja en los procesos de obtención y posterior caracterización de almidón nativo de Quinoa. El módulo cinco de este macroproyecto, tiene como objetivo el diseño en planta piloto para la recuperación de fase húmeda de almidón, secado, molienda y empaque.

Este proyecto se enfoca en la etapa de secado y consiste en el desarrollo de una tecnología adecuada para la reducción de la humedad en el crudo obteniendo almidón nativo de Quinoa. En la investigación realizada se encontró que para lograr el diseño del equipo se deben conocer tanto las propiedades del producto a secar (crudo de almidón de Quinoa) como del producto seco (almidón nativo de Quinoa), las cuales no se encontraban disponibles al momento del desarrollo del proyecto debido a que la caracterización se llevará a cabo en un proyecto posterior.

De acuerdo con lo anterior, se estableció hacer la descripción de los equipos principales de un secador tipo Spray Dryer; tecnología elegida que se ajusta a los requerimientos finales del producto y la formulación de una hoja de cálculo por medio de Microsoft Excel que permita a partir de los datos del producto a secar y las condiciones deseadas del producto seco, establecer el dimensionamiento de los equipos.

**Palabras Clave:** Secado, Almidón, Quinoa, Extracción, Diseño Mecánico.

## INTRODUCCIÓN

La organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura dio su nombramiento en el 2013 como el año internacional de la Quinoa, un pseudocereal originario de los Andes el cual es un recurso alimentario natural de alto valor nutritivo cuya importancia es cada vez más reconocida en la seguridad alimentaria para las generaciones presentes y futuras.

El grupo de investigación de la Fundación Universidad de América tiene como objetivo desarrollar una planta piloto con el propósito de escalar a nivel industrial la producción de almidones funcionalizados a partir de la semilla de Quinoa.

Investigaciones realizadas por el grupo antes mencionado, determinan que la forma como se ejecutan las etapas del proceso de obtención de almidón influye en las características finales del producto. Específicamente, en el caso del secado del crudo de almidón, variables como la temperatura, humedad y tiempo de permanencia entre otras, definen las características finales del almidón resultante.

A partir de las diferencias observadas es imperativo determinar las condiciones más adecuadas para el secado de crudo de almidón, por lo que se hace necesario para el grupo contar con un equipo de banco que permita realizar experimentación bajo distintas condiciones de secado de crudo. Esto permitirá evaluar el secado bajo diferentes entornos de operación con el fin de encontrar el método idóneo de secado del producto.

No obstante durante la investigación realizada se determinó que para lograr el diseño de los equipos que componen la tecnología de secado es necesario contar con la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del crudo de almidón. Es por esto que se optó por describir la tecnología apta para el secado y la creación de una hoja de cálculo por medio de la cual se logra el dimensionamiento de los equipos principales.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una tecnología a escala de banco, para el secado de almidón nativo de quinua.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Plantear un rango de metodologías y especificaciones de entrada del crudo de almidón de quinua para su proceso de secado.
- Evaluar las tecnologías y métodos utilizados para el secado de crudo de almidón, aplicables a las condiciones de experimentación requeridas.
- Realizar el diseño conceptual de la tecnología seleccionada, estableciendo los parámetros y muestra de cálculos propios del banco de secado.
- Realizar hojas de cálculo y esquemas del diseño planteado.

## 1. GENERALIDADES DEL ALMIDÓN DE QUINUA

*“El almidón de quinua tiene una excelente estabilidad frente al congelamiento y la retrogradación. Estos almidones podrían ofrecer una alternativa interesante para sustituir almidones modificados químicamente; tiene posibilidades especiales de uso en la industria debido al pequeño tamaño del gránulo de almidón, por ejemplo, en la producción de aerosoles, pastas, producción de papel autocopiante, postres alimenticios, excipientes en la industria plástica, talcos y polvos anti-offset”<sup>1</sup>.*

En el proceso de extracción de almidón a partir de la semilla de quinua se encuentra la etapa de secado de una solución compuesta por proteínas, aminoácidos, grasas y puntualmente el almidón; el cual se ha nombrado por el grupo de bioprospección e ingeniería química aplicada al estudio de biomoléculas e industria de la Fundación Universidad de América como “*Crudo de almidón*”.

### 1.1 OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE QUINUA

De acuerdo a la revisión bibliográfica se encontró que la extracción de almidón a partir de la semilla de quinua varía de acuerdo al autor.

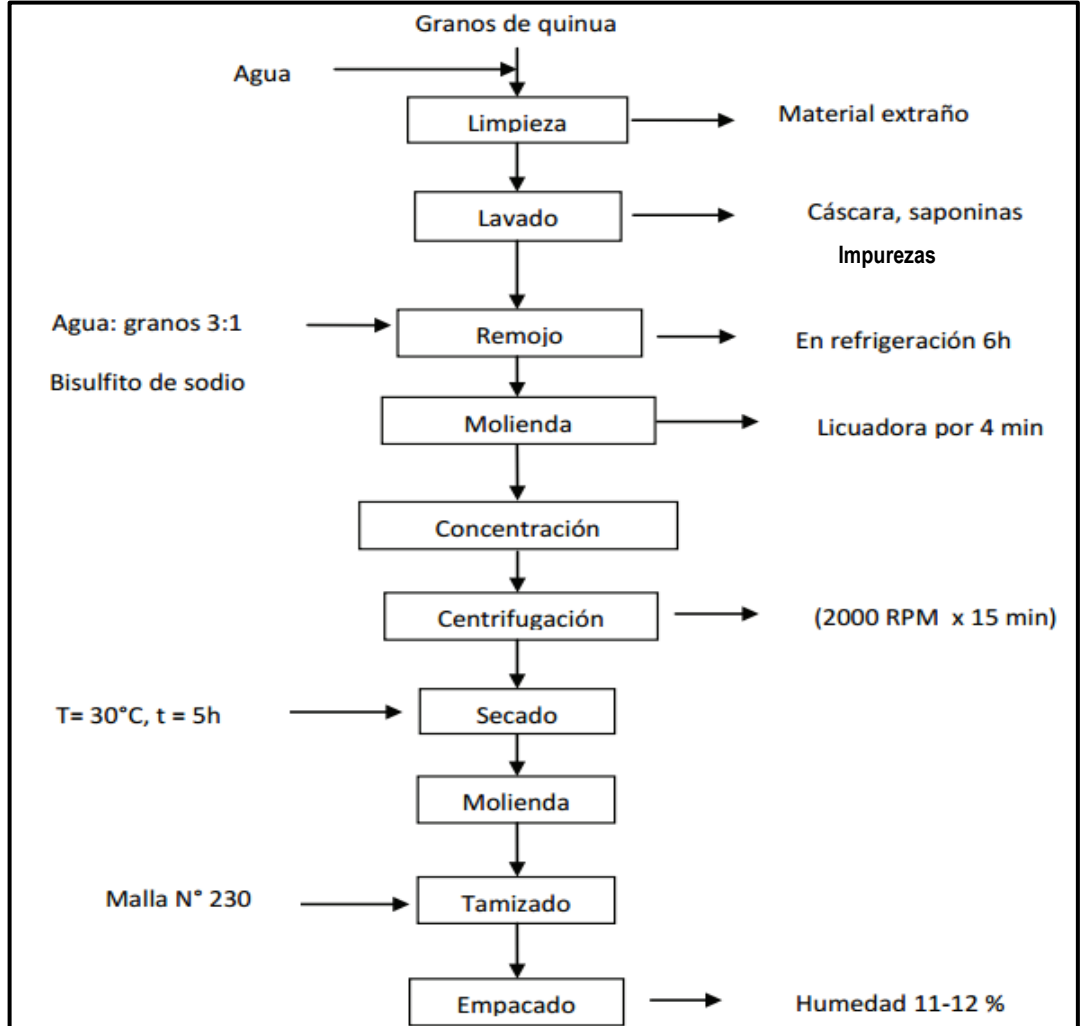
Arzapalo Quinto plantea el modelo de extracción de almidón mostrado en el **Esquema 1** a partir de tres variedades de semilla de quinua: Negra Collana (VC), Pasancalla Roja (VP) y Blanca Junin (VB). Se inicia con la limpieza para retirar cualquier material extraño que venga con esta. Se procede hacer un lavado para eliminar la cascara y las saponinas. Lo que queda del lavado se deja por un periodo de 6 horas en remojo con una relación 3:1 agua-granos. En una licuadora se muele la mezcla en remojo por 4 minutos obteniendo una mezcla concentrada. A continuación se hace un proceso de centrifugado a 2000 RPM por 15 minutos con el fin de retirar el exceso de agua y luego entra a un proceso de secado por debajo de la temperatura de gelatinización por 5 horas. El almidón ya seco es molido y tamizado para posteriormente ser empacado<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> FAO, Departments and Offices. Año Internacional De La Quinua. [Electronic(1)]. [Consultado el 05/012016]. Disponible en: <http://www.fao.org/quinoa-2013/what-is-quinoa/use/es/>

<sup>2</sup> ARZAPALO QUINTO, Doyla, et al. Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) negra collana, pasankalla roja y blanca j unin. En: Revista De La Sociedad Química Del Perú. vol. 81, no. 1, p. 44-54.

**Esquema 1.** Proceso de obtención escala laboratorio de almidón de quinua.



**Fuente.** ARZAPALO QUINTO, Doyla, et al. Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) negra collana, pasankalla roja y blanca junín. En: Revista De La Sociedad Química Del Perú. vol. 81, no. 1, p. 44-54

No obstante Bernal Claudio para la extracción de almidón a partir de quinua inicia con un proceso de molienda empleando el método II01UBU (protocolo experimental que permite forzar un rompimiento del funículo, dejando un grano desmembrado-abierto). A continuación se realiza una molienda húmeda del producto la cual permite obtener dos fracciones primarias de partida FPP1 y FPP2. La fracción FPP2 es sometida a una reacción alcalina con NaOH (5-7%), se agita y posteriormente se aplica una decantación forzada hasta obtener dos fases. Seguidamente se elimina el sobrenadante y se realizan tres lavados, los dos primeros se realizan con agua a temperatura entre 0-5°C hasta obtener el crudo de almidón. El tercer lavado se aplica al crudo de almidón utilizando agua a temperatura de 40 a 45°C. El crudo de almidón se seca en un horno TR 60-TR1050 Nabertherm, a una temperatura por debajo de la temperatura de

gelatinización (55°C) durante 24 horas. El producto en escamas es llevado a un molino de bolas CEN-MKII-12 y se finaliza con un ajuste del tamaño de partícula en CEN-MKII-13<sup>3</sup>.

Por otra parte Li Wang y Zhu emplearon el método propuesto por Annor, Marccone, Bertoft y Seetharaman<sup>4</sup> con algunas modificaciones. Inicialmente las semillas de quinua son congeladas con nitrógeno líquido por dos minutos, posteriormente son llevadas a un proceso de molienda utilizando un molino de café durante un minuto. La quinua molida (100g) se somete a una reacción con sodio buriatico (1L) por 30 minutos para remover proteínas y lípidos. A continuación el residuo (crudo de almidón) es sometido a dos procesos de centrifugado de 10 minutos cada uno; el primero en seco mientras que el segundo es con agua desionizada (1L). El residuo recuperado es suspendido en agua destilada durante 12 horas para separar las proteínas de los granos de almidón. El compuesto líquido de almidón es pasado a través de una malla de nylon de 140 µm. La fracción líquida es sometida a seis procesos de centrifugado donde se retira el sobrenadante. Finalmente el almidón resultante es secado en un horno de aire forzado a 35°C durante 48 horas<sup>5</sup>.

## 1.2 CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE QUINUA

La variación a nivel de familia, género o entre especies hace que la genética de los almidones sea diversa y este factor influye en la morfología de sus granos. Principalmente la base de este es su tamaño, forma y la presencia o aparición de características como el *hilum* (punto de nucleación a partir del cual se forman los granos de almidón) grado de agregación y visibilidad de las estrías entre otras.<sup>6</sup>

La FAO realizó en 2013 una recopilación, clasificación, caracterización y estudio de las principales variedades comerciales de Quinua en el Perú, país cabeza en la producción y exportación del pseudocereal<sup>7</sup>. Este estudio permite identificar que sin importar la altura del cultivo, diámetro del grano o el peso de 1000 granos de la semilla el porcentaje volumétrico que ocupa el perisperma en la semilla no es tan variable. Un ejemplo de esto es la especie Negra Collana (INIA 420) que se presenta en alturas de cultivo entre 3800 metros sobre el nivel del mar (msnm) y con diámetro de grano de 1,6 mm se compone en un 36% de su perisperma y la especie Hancayo la cual es la más grande (diámetro de grano de 4,2 mm) se componen en un 30% de éste, véase la **Tabla 1**.

---

<sup>3</sup> BERNAL BUSTOS, Claudio Raúl, et al. CARACTERIZACIÓN DE GRANULOS DE ALMIDÓN NATIVO DE QUINUA POR IR-ATR, MEB, DRX.

<sup>4</sup> Annor, G. A., Marccone, M., Bertoft, E., & Seetharaman, K. (2014). Physical and molecular characterization of millet starches. *Cereal Chemistry*, 91, 286–292.

<sup>5</sup> WANG, Li y ZHU, Fan. Physicochemical properties of quinoa starch. En: *Carbohydrate Polymers*. 15/10/2015.

<sup>6</sup> MEDINA, Jorge Alberto y SALAS, Juan Camilo. Caracterización morfológica del granulo de almidón nativo: Apariencia, forma, tamaño y su distribución. Mayo de 2008.

<sup>7</sup> APAZA Vidal, et al. CATÁLOGO DE VARIEDADES COMERCIALES DE QUINUA EN EL PERÚ.



**Tabla 1.** Variaciones de tamaño y peso de grano de variedades comerciales de quinua en Perú.

Especie	Altura de cultivo (msnm)	Diámetro grano (mm)	Peso 1000 granos (Kg)	Perisperma %	Color perisperma
INIA 431 – ALTIPLANO	3800 - 3950	2,20	3,30	38,0	BLANCO
INIA 427-AMARILLA SACACA	2750 - 3650	2,10	2,90 - 3,03	32,0	BLANCO
INIA 420 – NEGRA COLLANA	3800 - 3900	1,60	2,03	36,0	BLANCO
INIA 415 – PASANKALLA	3800 - 3900	2,10	3,51- - 3,72	34,0	BLANCO
ILLPA INIA	3800 - 3900	2,20	3,40- - 3,60	31,0	BLANCO
SALCEDO INIA	3800 - 3950	2,00	3,10 - 3,70	33,0	BLANCO
QUILLAHUAMAN INIA	3500	2,00	1,80 - 2,60	36,0	BLANCO
AMARILLA MARANGANI	3650	2,00	2,70 - 3,10	35,0	BLANCO
BLANCA DE JULI	3800 - 3900	1,60	2,22	37,0	BLANCO
KAKOLLA	3800 - 3900	1,80	2,70	36,0	BLANCO
BLANCA DE JUNIN	3500	2,20	2,10- - 3,80	34,0	BLANCO
HUALHUAS	3700 - 4000	2,10	3,50 - 3,80	31,0	BLANCO
HUANCAYO	3200 - 3400	4,20	2,00	30,0	BLANCO

**Fuente.** Apaza Vidal, et al. CATÁLOGO DE VARIEDADES COMERCIALES DE QUINUA EN EL PERÚ.

El estudio taxonómico realizado por la misma organización indica que en la semilla de quinua se pueden reconocer tres partes bien definidas<sup>8</sup>:

- **Episperm.** *Contiene la saponinas que dan el sabor amargo al alimento y varía de acuerdo al genotipo.*
- **Embrión.** *Constituye el 30% del total de la semilla y rodea el perisperma como un anillo.*
- **Perisperma.** *Constituye el 60% del total de la semilla y en éste se encuentra la mayor concentración de almidón.*

<sup>8</sup> APAZA Vidal, et al. Ibid., p. 10.

### 1.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL ALMIDÓN DETERMINANTES PARA LA ETAPA DE SECADO

Se establecieron las propiedades físico-químicas del almidón relevantes en la etapa de secado con el fin de controlar los comportamientos del mismo (véase sección 1.4 de este capítulo). El proceso de secado consiste en la deshidratación del almidón húmedo por medio de la exposición al calor, reduciendo así su porcentaje de humedad; esta y otras propiedades (poder de hinchamiento y el índice de solubilidad en agua) fueron analizadas por Li Wang y Fan Zhu en un estudio realizado a 26 variedades de quinua provenientes de Latinoamérica, China, Tailandia y Canadá<sup>9</sup>.

En este estudio, el rango del contenido de humedad varió entre 8.7% en la muestra S3 a 14% en las muestras S23 y S24 con un valor promedio de 10.1%. Por otra parte, el almidón mostró una amplia variación en las propiedades de hinchamiento y solubilidad en el agua; ambas aumentaron con la temperatura, aunque dicha variación no corresponde a un modelo lineal. Con respecto al poder de hinchamiento el promedio de las muestras fue de 23.2g de agua necesarios para hinchar 1g de almidón siendo la muestra S26 la de mayor gramos necesarios de agua (33.1g) y la muestra S17 la que requiere menos gramos de agua (19g). De forma paralela el índice de solubilidad en agua tuvo un promedio de 48,6% siendo nuevamente la muestra S17 la de menor porcentaje (21,6%) y la muestra S26 la de mayor porcentaje (75,7%); se aprecia en la **Tabla 2**.<sup>10</sup>

**Tabla 2.** Porcentaje de humedad, poder de hinchamiento e índice de solubilidad de 26 muestras de almidón de quinua.

MUESTRA	PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)	PODER DE HINCHAMIENTO g/g	INDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA %
S1	9,1	21,4	43,1
S2	10,2	25,9	66,9
S3	8,7	22,8	56,3
S4	9,0	21,1	38,3
S5	9,7	22,8	36,9
S6	9,1	22,2	34,9
S7	8,8	22,6	46,8
S8	10,0	22,5	48,8
S9	9,9	20,7	38,5
S10	8,8	23,2	45,8
S11	9,9	22,9	47,6

<sup>9</sup> WANG, Li y ZHU, Fan. Op., Cit., 167.

<sup>10</sup> WANG, Li y ZHU. Ibid. p. 185

**Tabla 2. (Continuación).**

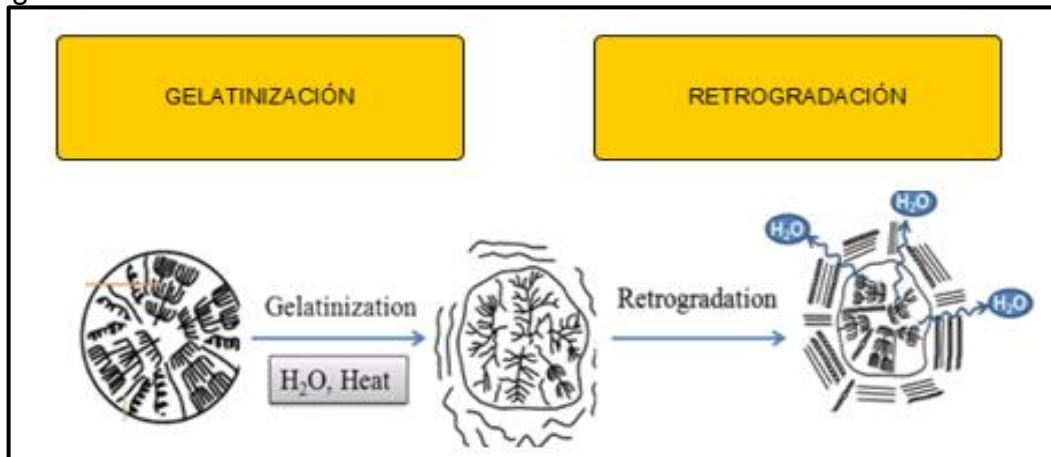
MUESTRA	PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)	PODER DE HINCHAMIENTO g/g	INDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA %
S12	9,7	22,4	31,6
S13	9,5	21,6	42,7
S14	9,2	25,4	53,7
S15	9,6	20,3	36,9
S16	9,1	19,9	29,8
S17	8,6	19,0	21,6
S18	9,9	22,1	44,0
S19	9,1	21,6	40,8
S20	9,9	23,7	63,6
S21	9,9	24,9	65,1
S22	13,5	26,5	74,8
S23	14,0	26,6	62,7
S24	14,0	24,1	70,0
S25	13,5	23,3	46,4
S26	10,0	33,1	75,7
<b>PROMEDIO</b>	<b>10,1</b>	<b>23,2</b>	<b>48,6</b>

**Fuente.** WANG, Li y ZHU, Fan. Physicochemical properties of quinoa starch. En: Carbohydrate Polymers. 15/10/2015. Modificado por los autores.

#### **1.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE SECADO DE CRUDO DE ALMIDÓN DE QUINUA**

La principal influencia de la temperatura en la etapa de secado de crudo de almidón es la posibilidad de que éste presente comportamientos de gelatinización y retrogradación los cuales van de la mano con la transformación de las estructuras cristalinas del mismo. Véase la **Figura 1**.

**Figura 1.** Comportamiento de gelatinización y retrogradación en los granos de almidón.



**Fuente.** Gelatinización y Retrogradación del almidón. [online]. Consultado el OCTUBRE 9 2015. Disponible en: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/SeminarioGelatinizacionyretrogradacion\\_25483.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/SeminarioGelatinizacionyretrogradacion_25483.pdf)

El fenómeno de gelatinización se presenta cuando se eleva la temperatura de los granos de almidón (temperatura de gelatinización) y a su vez éstos se encuentran en exceso de agua generando el hinchamiento de los mismos. Al estar hidratados los granos presentan un cambio en su estructura por la salida de la amilosa que los compone, generando así un producto gelatinizado. Cuando se disminuye la temperatura del almidón gelatinizado la amilosa vuelve a organizarse haciendo que su estructura cristalina sea más compacta; lo que se conoce como fenómeno de retrogradación.<sup>11</sup>

Arzapalo Quinto determinó que la temperatura de gelatinización para tres variedades de quinua varía de 65,5 a 68°C (véase la tabla 3), mientras que Bernal Claudio propone una temperatura de gelatinización inferior a 55°C.<sup>12</sup> En la **Tabla 3** se pueden apreciar diferentes temperaturas de gelatinización para diferentes quinuas.

<sup>11</sup> HASUDUNGAN, Armando. Starch. You Tube, 2014

<sup>12</sup> BERNAL BUSTOS, Claudio Raúl, et al. Op., Cit., p. 116.

**Tabla 3.** Temperatura de gelatinización de tres variedades de quinua.

---

<b>VARIEDAD</b>	<b>TEMPERATURA DE GELATINIZACION °C</b>
Negra Collana	65,5
Pasancalla Roja	68
Blanca Junin	68,5

---

**Fuente:** ARZAPALO QUINTO, Doyle, et al. Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) negra collana, pasancalla roja y blanca junín. En: Revista De La Sociedad Química Del Perú. vol. 81, no. 1, p. 44-54.

## 2. GENERALIDADES DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE SECADO DE CRUDO DE ALMIDÓN

El secado es una operación unitaria que consiste en la remoción de un solvente, comúnmente el agua para la producción de un sólido con cierta proporción de líquido. En los procesos de secado, el sólido presenta formas de escamas, cristales o polvo<sup>13</sup>. El secado de crudo de almidón es el proceso de deshidratar el almidón húmedo mediante la exposición al calor. Los diferentes tipos de almidones nativos se secan empleando métodos naturales o artificiales.

### 2.1 TECNOLOGÍAS DE SECADO DE MEZCLAS SOLIDO-LIQUIDO APLICABLES AL SECADO DE ALMIDONES

Los procesos de secado varían de acuerdo a la tecnología empleada y las condiciones de operación necesarias las cuales son definidas por los requerimientos del producto final; es por esto que de acuerdo a la revisión bibliográfica hecha se encontró que las principales tecnologías de secado de mezclas sólido-líquido aplicables al secado de almidones son:

**2.1.1 Secado al sol.** El almidón es esparcido en bandejas las cuales están cubiertas con polietileno de espesor No. 6 para facilitar el secado ya que estas atraen la radiación. Una tonelada de almidón necesitara aproximadamente 1000 m<sup>2</sup> de superficie de secado. El almidón necesita alrededor de 6 horas de secado y debe ser movido con rastrillos para asegurar un secado uniforme<sup>14</sup>. En la **Figura 2** se puede observar un ejemplo de secado de almidón al sol.

**Figura 2.** Sistema de secado de almidón agrío de yuca en rallanderias del cauca.



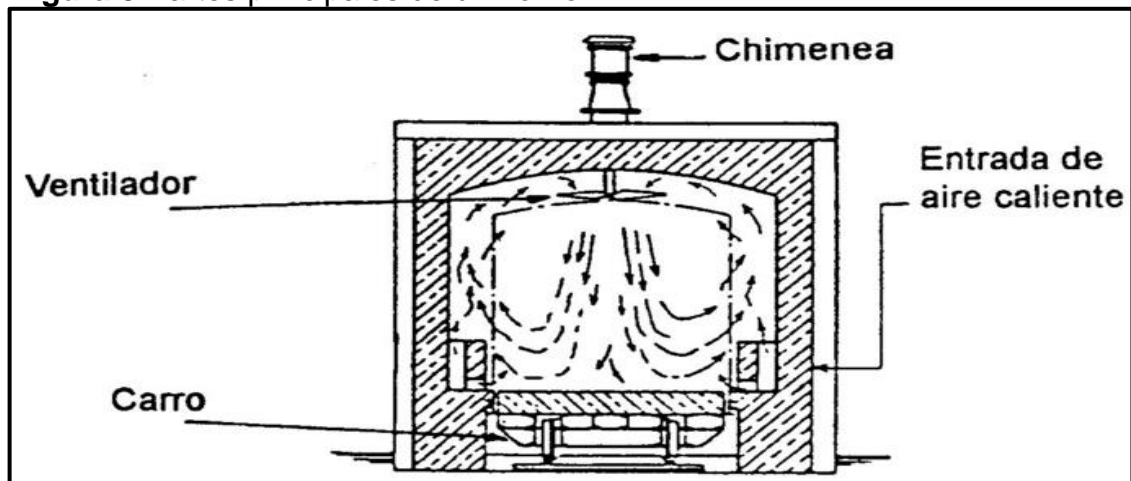
**Fuente.** ALARCÓN, M. Freddy y DUFOUR, Domuniqué. ALMIDON AGRIO DE YUCA EN COLOMBIA TOMO 1: Producción y Recomendaciones. 2002 ed. Cali, Colombia: Artes Gráficas, CIAT, 1998. p. 48958-9439-67-5

<sup>13</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Diseño De Un Secador Por Atomización a Nivel Piloto Para Jugo Concentrado De Tomate De Árbol. Sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química Ingeniería Química: Universidad Nacional, 2003.

<sup>14</sup> ALARCÓN, M. Freddy y DUFOUR, Domuniqué. ALMIDON AGRIO DE YUCA EN COLOMBIA TOMO 1: Producción y Recomendaciones. 2002 ed. Cali, Colombia: Artes Gráficas, CIAT, 1998. p. 48958-9439-67-5

**2.1.2 Secado en horno.** El uso de hornos en el proceso de secado de crudo para la obtención de almidón se restringe debido a que el tamaño del horno es directamente proporcional a la cantidad de almidón que quiere ser procesado, es decir, si se quiere secar gran cantidad de almidón se necesitara un horno de gran tamaño lo cual resulta ineficiente. Por otra parte esta tecnología ofrece ambientes controlados de temperatura, lo que es importante para mantener una temperatura constante en todo el horno evitando la degradación del mismo para no llegar al punto de gelatinización del almidón<sup>15</sup>, Véase Figura 3.

**Figura 3.**Partes principales de un horno.



Fuente. BOHORQUEZ ARIZA, HERNANDO ENRIQUE. MAQUINARIA EQUIPOS DE ALIMENTOS. [online]. Datateca Universidad Nacional. [Consultado el 05/012016]. Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion\\_50\\_secadores.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion_50_secadores.html).

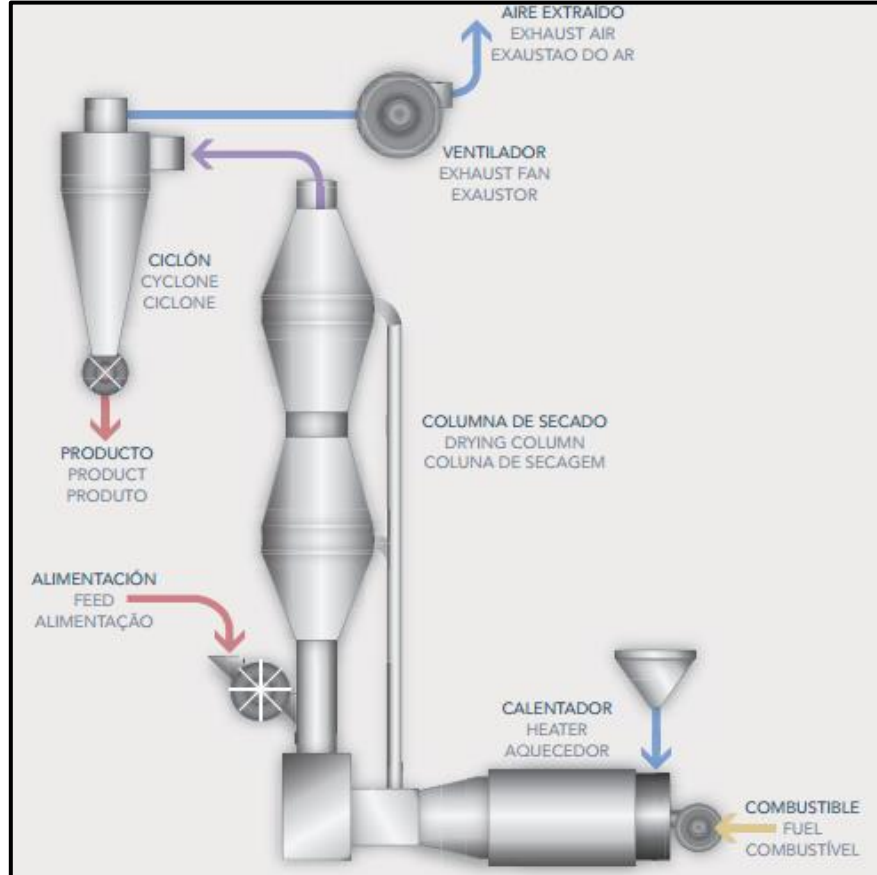
**2.1.3 Secado con tecnología flash Dryer.** El secador Flash es una tecnología que puede ser utilizada para secar crudo de almidón proporcionando una reducción de humedad hasta del 85%. Éste introduce sólidos húmedos en una columna vertical por la cual circula aire caliente a alta velocidad.

Los sólidos húmedos, en este caso el crudo de almidón, se deben disgregar para aumentar el coeficiente convectivo. La mezcla de aire-partículas es pasada por un ciclón que separa los sólidos del aire obteniendo un producto seco. En caso de sólidos con alta humedad es posible agregar un sistema de recirculación que garantice el secado<sup>16</sup>. En la **Figura 4**, se aprecia un secador tipo flash.

<sup>15</sup> BOHORQUEZ ARIZA, HERNANDO ENRIQUE. MAQUINARIA EQUIPOS DE ALIMENTOS. [online]. Datateca Universidad Nacional. [Consultado el 05/012016]. Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion\\_50\\_secadores.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion_50_secadores.html)

<sup>16</sup> SEI, Contreras Ingeniería. [Electronic(1)]. [Consultado el Septiembre 22015]. Disponible en: <http://seicontreras.com/es/equipos/>

**Figura 4.** Secador SEI-CONTRERAS ingeniería.



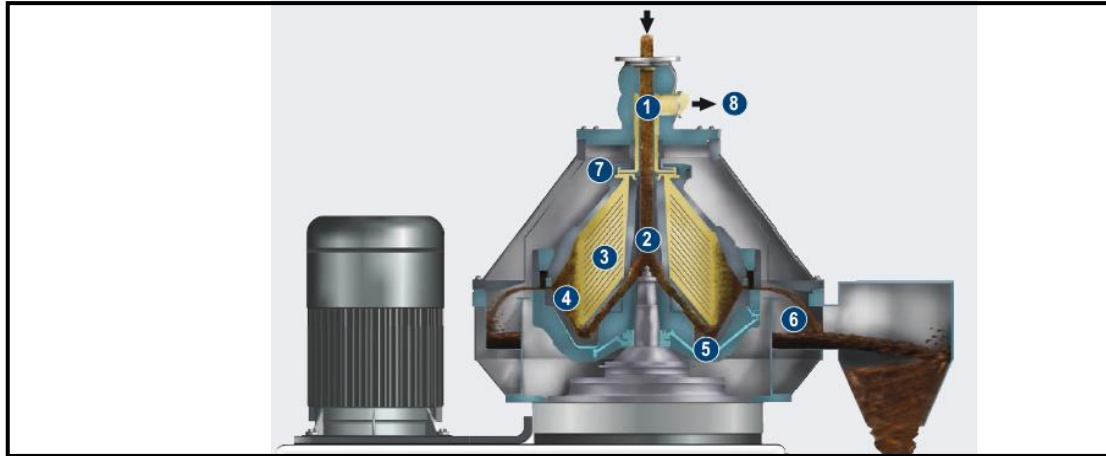
**Fuente.** SEI, Contreras Ingeniería. [Electronic(1)]. [Consultado el Septiembre 22015]. Disponible en: <http://seicontreras.com/es/equipos/>

**2.1.4 Secado en centrifuga de platos cónicos.** Es una tecnología comúnmente utilizada en procesos de separación continua de emulsiones. Las centrifugas de discos usan alta velocidad para la separación mecánica y la clarificación de mezclas de sólidos y líquidos. Se utilizan en diversos sectores industriales tales como la industria cervecera y de bebidas, la industria del almidón, química y biotecnología y en la extracción y procesamiento de grasas y aceites<sup>17</sup>. En la **Figura 5** se presenta el corte trasversal de un dispositivo utilizado para la separación de mezclas.

<sup>17</sup> SEI, Contreras Ingeniería. Ibid.p. 35.



**Figura 5.** Etapas de operación de una Centrífuga de platos.



**Fuente.** SEI, Contreras Ingeniería. [Electronic(1)]. [Consultado el Septiembre 22015]. Disponible en: <http://seicontreras.com/es/equipos/>

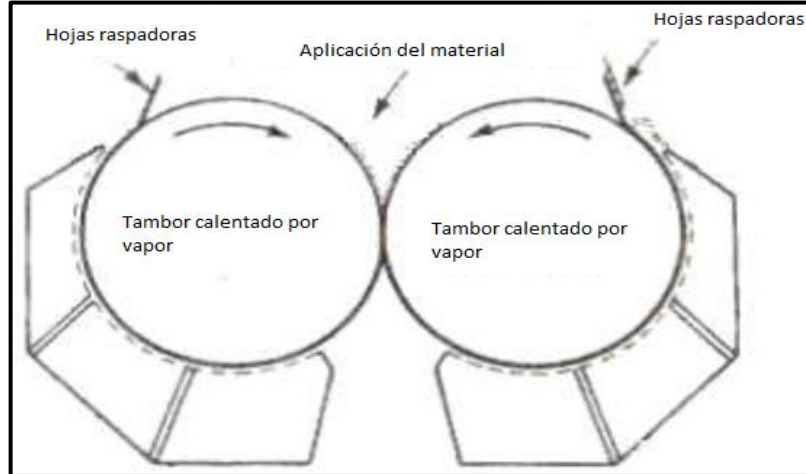
El producto a ser clarificado se introduce a través de un tubo de alimentación estacionario (1) en el interior del tambor y es acelerado suavemente a la velocidad del tambor por el distribuidor (2). El paquete de discos (3) del tambor divide la corriente de producto en varias capas finas y crea una gran superficie de clarificación. La separación sólido-líquido tiene lugar en el interior del paquete de discos. Como consecuencia de la alta fuerza centrífuga, los sólidos separados se depositan en la cámara de sólidos del tambor (4). Los sólidos separados son expulsados periódicamente (6) mediante un sistema hidráulico accionando el pistón deslizante (5) y un ciclón de sólidos. El líquido clarificado circula desde el sistema de discos hasta un rodete centrípeta (7), que descarga el líquido de la máquina con presión (8).<sup>18</sup>

**2.1.5 Secado por medio de rodillos.** Es una tecnología que tiene como principio de operación el secado por contacto, en el cual una superficie caliente aporta vapor por conducción. Se considera como un proceso continuo debido a que el calor de secado se transfiere al sólido húmedo a través de los rodillos. En la **Figura 6** se puede observar un sistema de rodillos típico<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> SEI, Contreras Ingeniería. Ibid. p. 41

<sup>19</sup> MEJIA BURGOS, ANDRES y ACOSTA HURTADO, FELIPE. Condiciones De Operación De Un Secador De Rodillos En La Deshidratación De Residuos De Tomate (*Lycopersicum Esculentum* Mill).

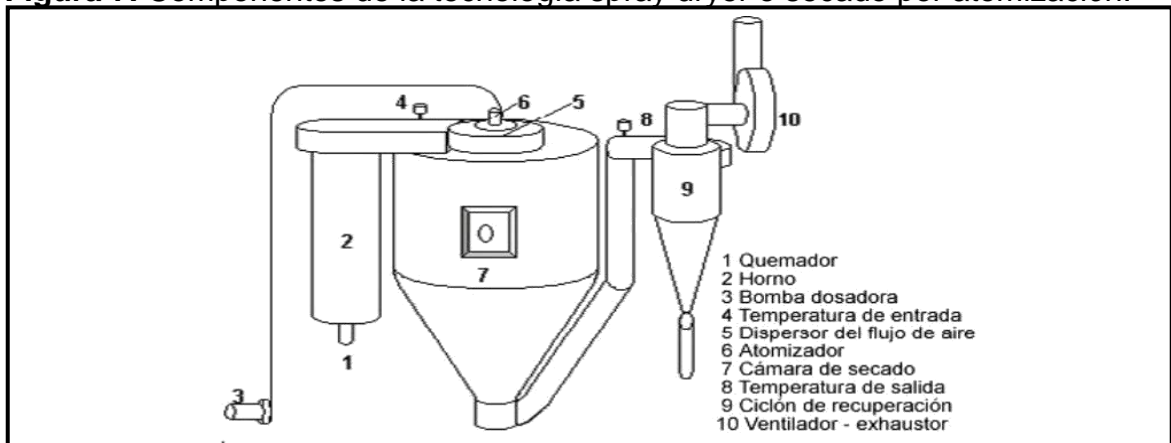
**Figura 6.** Diagrama de un secador de Rodillos.



**Fuente.** MEJIA BURGOS, ANDRES y ACOSTA HURTADO, FELIPE. Condiciones De Operación De Un Secador De Rodillos En La Deshidratación De Residuos De Tomate (*Lycopersicum Esculentum* Mill).

**2.1.6 Secado por atomización.** Es una tecnología que tiene como principio la atomización, la cual consiste en llevar al material (crudo de almidón) al máximo punto de goteo haciendo que de esta manera su viscosidad sea más baja y luego por un medio convectivo que puede ser aire caliente, se disminuya su porcentaje de humedad. Esta tecnología está compuesta por una cadena de equipos los cuales se pueden identificar en la Figura 7<sup>20</sup>.

**Figura 7.** Componentes de la tecnología spray dryer o secado por atomización.



**Fuente.** YANZA HURTADO, Erik Germán. Diseño De Un Secador Por Atomización a Nivel Piloto Para Jugo Concentrado De Tomate De Árbol. Sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química. Universidad Nacional, 2003.

<sup>20</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Op. Cit. p. 87.

## 2.2 DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Yanza Hurtado plantea seis principales criterios para la elección de la tecnología adecuada en procesos de secado los cuales aportan la base fundamental para la elección del medio de secado ideal y en consecuencia los equipos necesarios para la ejecución de la operación. De acuerdo a la revisión bibliográfica hecha los criterios que se tendrán en cuenta para la selección de la alternativa de secado son<sup>21</sup>:

- Tipo de operación. Indica si la tecnología opera de forma continua o discontinua, es decir, que el material a secar disminuye el porcentaje de humedad de forma constante (continua), mientras que en los casos que el material pasa por etapas para la pérdida de humedad se conoce como operación (discontinua). En el tipo de operación se busca que sea continua para evitar oscilaciones en la temperatura y de esta forma que no se presente los comportamientos de gelatinización y retrogradación mencionados en el capítulo 1.
- Fuente de calor. Está directamente relacionada con el poder calorífico del medio, el cual puede ser vapor, agua caliente, gas de combustión, entre otros. Para evitar contaminar el crudo de almidón se recomienda usar fuentes de calor neutras como el aire.
- Medio de transmisión. Se debe tener en cuenta el mecanismo de transferencia de calor que emplea el equipo (conducción o convección). Para las operaciones de secado de crudo es recomendable el uso de medios convectivos para lograr secados uniformes.
- Seguridad del proceso. *“Es importante comprender las medidas de seguridad tanto de operación como la normatividad ambiental en la extracción de humedad de algunos productos, ya que los gases de evaporación no deben ser eliminados sin contar con protocolos establecidos”<sup>22</sup>*. Para el proceso de secado de crudo de almidón se debe contar con medidas de seguridad para el control de partículas y emisiones contaminantes.
- Temperatura de trabajo. Está directamente relacionada con las propiedades físico-químicas del producto ya que debido a cambios de temperatura éste podría presentar ciertos comportamientos. La temperatura de trabajo ideal debe ser inferior a la temperatura de gelatinización, de acuerdo a la revisión bibliográfica, para el almidón de Quinoa está alrededor de los 50°C.

---

<sup>21</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Ibid.

<sup>22</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Ibid.

- Eficiencia. Directamente relacionada en la transformación de energía que genera la tecnología, comúnmente se transforma energía eléctrica en energía térmica para equipos de secado. Se buscan altas eficiencias para evitar aumentos en los costos de operación.

De acuerdo a la revisión bibliográfica, se determinó que las tecnologías aplicables para el secado de crudo de almidón proveniente de la semilla de quinua se describen en el **Cuadro 1**.

**Cuadro 1.** Tecnologías aplicables para secado de almidón de quinua.

TECNOLOGÍA	FUNCIONAMIENTO	PROCESO PREVIO	PROCESO POSTERIOR	TEMPERATURA DE TRABAJO (°C)
<b>SECADOR TIPO FLASH DRYER</b>	Por medio de corriente de aire caliente el material es secado y enviado a ciclones para la separación del aire.	Centrifugado	-	50-120
<b>CENTRÍFUGA DE PLATOS CÓNICOS</b>	Por medio de movimiento rotatorio se disminuye el % de humedad.	-	Secado en horno	100-150
<b>SECADOR DE RODILLOS</b>	El material pasa por medio de rodillos con temperaturas cercanas al punto de ebullición del fluido con el que se encuentre mezclado el sólido.	Centrifugado	Cadenas de rodillos	100-150
<b>SECADOR SPRAY DRYER</b>	Por medio de un atomizador el fluido se convierte en gotas de 2 a 3 mm, las cuales al entrar en contacto con aire caliente disminuyen su humedad generando así el secado del material.	-	-	50-110

**Fuente:** SEI, Contreras Ingeniería. [Electronic(1)]. [Consultado el Septiembre 22015]. Disponible en: <http://seicontreras.com/es/equipos/>, MEJIA BURGOS, ANDRES y ACOSTA HURTADO, FELIPE. Condiciones De Operación De Un Secador De Rodillos En La Deshidratación De Residuos De Tomate (*Lycopersicum Esculentum* Mill)., YANZA HURTADO, Erik Germán. Diseño De Un Secador Por Atomización a Nivel Piloto Para Jugo Concentrado De Tomate De Árbol. Sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química Ingeniería Química: Universidad Nacional, 2003.

De acuerdo a lo criterios de selección establecidos y teniendo en cuenta su impacto en el producto resultante del proceso de secado de almidón de quinua los valores para cada parámetro se aprecian en el **Cuadro 2**.

**Cuadro 2.** Valor de cada parámetro de selección.

PARAMETRO	OPCIÓN	VALOR
TIPO DE OPERACIÓN (TO)	Continua	4
	Discontinua	2
FUENTE DE CALOR (FC)	Aire	5
	Agua	4
	Vapor	3
	Aceite	2
MEDIO DE TRANSMISIÓN (MT)	Convección	5
	Conducción	1
SEGURIDAD DEL PROCESO (SP)	I	2
	II	3
	III	5
TEMPERATURA DE TRABAJO °C (TT)	0-50	5
	50-100	4
	100-150	3
	150-200	2
EFICIENCIA % (E)	20-40	2
	40-60	3
	60-80	4

Seguido de la valoración de cada parámetro de selección. En el **Cuadro 3** se realizó la evaluación de cada uno de los criterios sobre las posibles alternativas de tecnología de secado de crudo de almidón.

**Cuadro 3.** Evaluación de parámetros.

TECNOLOGÍA	TO	FC	MT	SP	TT (°C)	E %
SECADOR TIPO FLASH DRYER	Continua	Aire	Convección	III	50-120	60
CENTRIFUGA DE PLATOS CÓNICOS	Discontinua	Vapor	Conducción	II	100-150	40
SECADOR DE RODILLOS	Discontinua	Agua	Conducción	II	100-150	50
SECADOR SPRAY DRYER	Continua	Aire	Convección	III	50-110	70

Finalmente, en el **Cuadro 4** se estimó el puntaje de cada parámetro por cada una de las tecnologías y de esta manera haciendo la sumatoria se encontró que la

tecnología adecuada para el secado de crudo de almidón proveniente de quinua es la empleada por el secador spray dryer o secado por atomización.

**Cuadro 4.** Puntaje de parámetros de cada tecnología.

TECNOLOGÍA	TO	FC	MT	SP	TT (°C)	E %	TOTAL
SECADOR TIPO FLASH DRYER	4	5	5	2	4	3	23
CENTRÍFUGA DE PLATOS CÓNICOS	2	3	1	5	3	2	16
SECADOR DE RODILLOS	2	4	1	5	3	3	18
SECADOR SPRAY DRYER	4	5	5	2	4	4	24

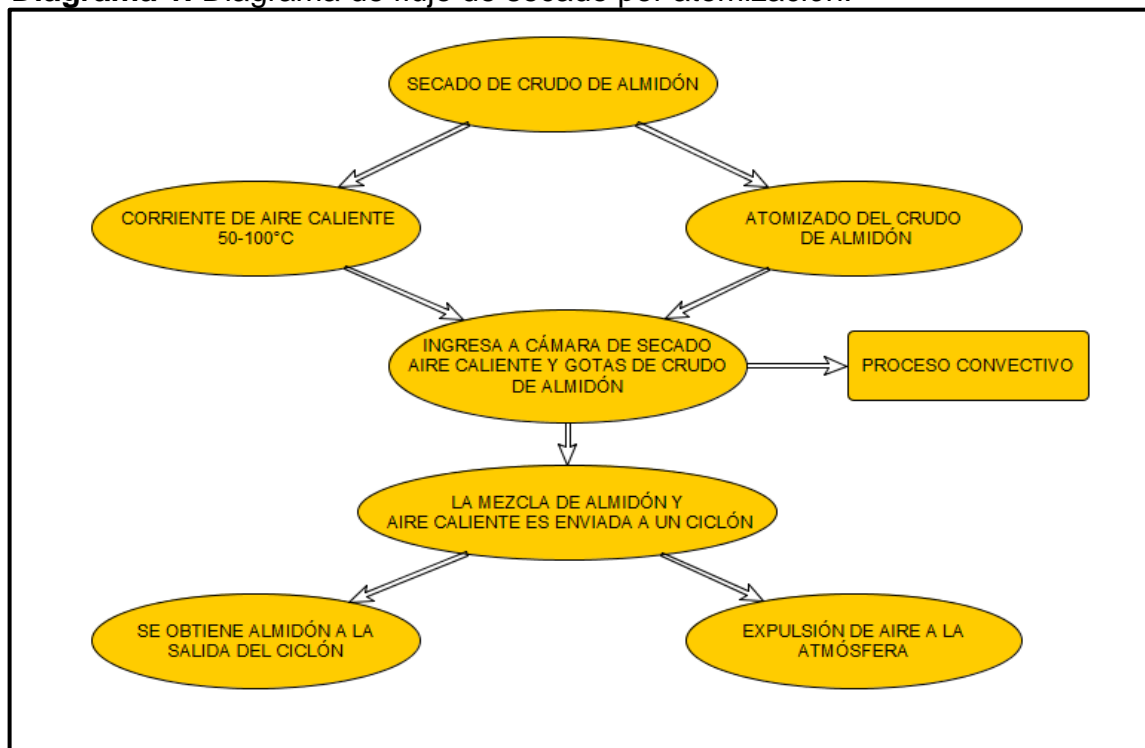
### 3. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE SECADO A ESCALA LABORATORIO

El diseño se orienta a la generación de un banco de secado, mediante el cual se pueden controlar las variables de funcionamiento para determinar los valores correctos de operación sin afectar las características físico-químicas requeridas en la obtención de almidón nativo a partir de la semilla de Quinua; sin embargo, para realizar el diseño de un equipo de secado se requieren las especificaciones tanto del producto a secar como las del producto seco en sí. Debido a que actualmente no se cuenta con la caracterización requerida del crudo de almidón, en este capítulo se hace la explicación detallada de los sistemas que componen el equipo así como los cálculos requeridos para su dimensionamiento.

#### 3.1 FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR

De acuerdo a la selección de alternativas realizada, la tecnología empleada en los secadores tipo spray dryer o secado por atomización es la base para el diseño del banco de secado. En el **Diagrama 1** se presenta el proceso de secado estándar para la tecnología seleccionada.

**Diagrama 1.** Diagrama de flujo de secado por atomización.

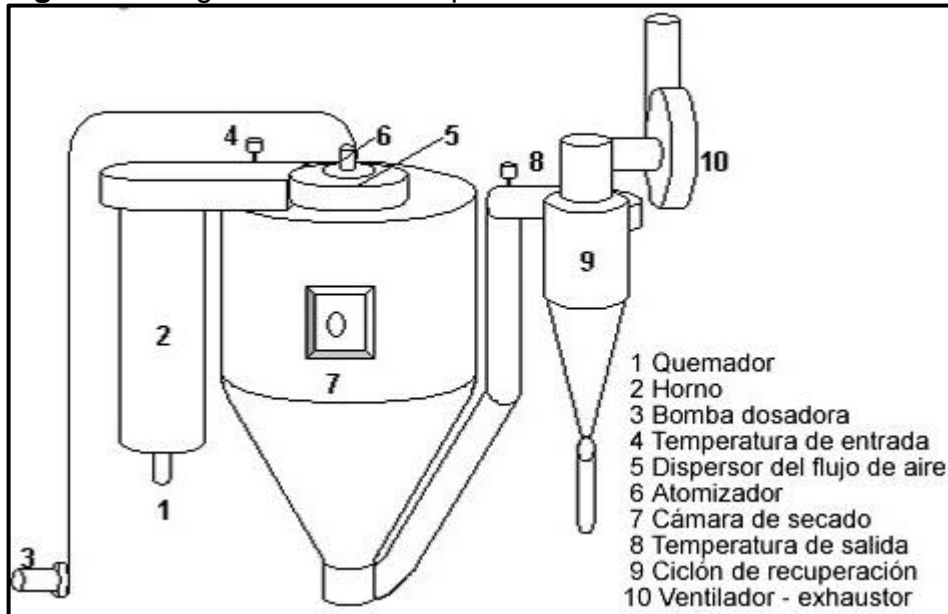


En la **Figura 8** se describe el proceso llevado a cabo en un secado por atomización, en el cual por medio de un quemador (1) en el horno (2) se calienta una corriente de aire entre 50°C – 100°C, se plantea este rango de temperaturas

ya que gracias a la revisión bibliográfica hecha en el capítulo 2 se argumentó que el equipo debe operar por debajo de la temperatura de gelatinización del almidón (45-55°C), sin embargo, por efecto de la atomización las fracciones de almidón en gotas de agua podrían no presentar este comportamiento ya que el tiempo de permanencia de las mismas en la cámara de secado es reducido y no se encuentran en presencia excesiva de agua.

Mientras esto ocurre la bomba dosificadora (3) impulsa el material (crudo de almidón) por medio de tuberías hasta el atomizador (6) que convierte el flujo en gotas, éstas entran en contacto con el aire dispersado (5). En la cámara de secado (7) por acción convectiva se reduce el porcentaje de humedad del almidón el cual es recuperado por el ciclón (9) por efectos de gravedad separa el aire caliente con temperatura de salida (8) del almidón resultante. El aire es finalmente enviado a la atmósfera por el ventilador-exhaustor (10).

**Figura 8.** Diagrama de secado por atomización.



**Fuente.** YANZA HURTADO, Erik Germán. Diseño De Un Secador Por Atomización a Nivel Piloto Para Jugo Concentrado De Tomate De Árbol. Sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química Ingeniería Química: Universidad Nacional, 2003.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DEL EQUIPO

De acuerdo al proceso llevado a cabo en una tecnología por atomización se pueden identificar tres etapas principales; atomización del producto a secar con una alta dispersión de gotas (1), mezclado de producto en gotas con un medio convectivo normalmente aire caliente con el fin de reducir la humedad y obtener un producto seco (2), finalmente recuperación del producto seco separándolo del



aire de salida (3).<sup>23</sup> En relación a las macro etapas llevadas a cabo la tecnología se compone de cinco sistemas, atomización, secado, recuperación, distribución de aire y alimentación de producto.

**3.2.1 Sistema de atomización.** La atomización es la fase crítica en el proceso de secado tipo spray dryer ya que ésta transforma una materia en gotas pequeñas. La materia convertida puede estar en forma de pasta, solución o suspensión; esta fase define la energía requerida por el spray así como también el tamaño y distribución de las gotas<sup>24</sup>.

*“El objeto de la atomización es crear la mayor superficie posible de la cual tendrá lugar la evaporación”<sup>25</sup>*, es decir, cuanto más pequeñas sean las gotas, mayor será la superficie de secado por lo tanto la evaporación será más fácil.<sup>26</sup> Por ejemplo, un metro cúbico de líquido forma aproximadamente  $2 \times 10^{12}$  gotas uniformes de 100 $\mu$ m de diámetro cada una, con una superficie total de área de (60000m<sup>2</sup>)<sup>27</sup>. En conclusión, la eficiencia térmica del secador está directamente relacionada con el área de superficie disponible.

Los dispositivos comúnmente utilizados para la atomización son: el atomizador rotatorio, el cual de acuerdo a sus cavidades se clasifica como se puede ver en la **Figura 9**, atomizador por toberas de presión, atomizador de toberas neumáticas, aquellos que la corriente de aire y líquido entran en la misma dirección y presión a la cámara de secado, tal y como se aprecia en la **Figura 10** y el atomizador ultrasónico.<sup>28</sup>

---

<sup>23</sup> SADIKOGLU,H. Spray Freeze Drying. En: WOO,M.; MUJUMDAR, Aruns S. y DAUD,W. Spray Drying Technology. Volumen 1 ed. 157 p.

<sup>24</sup> FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. Handbook of Industrial Drying. 215 p.

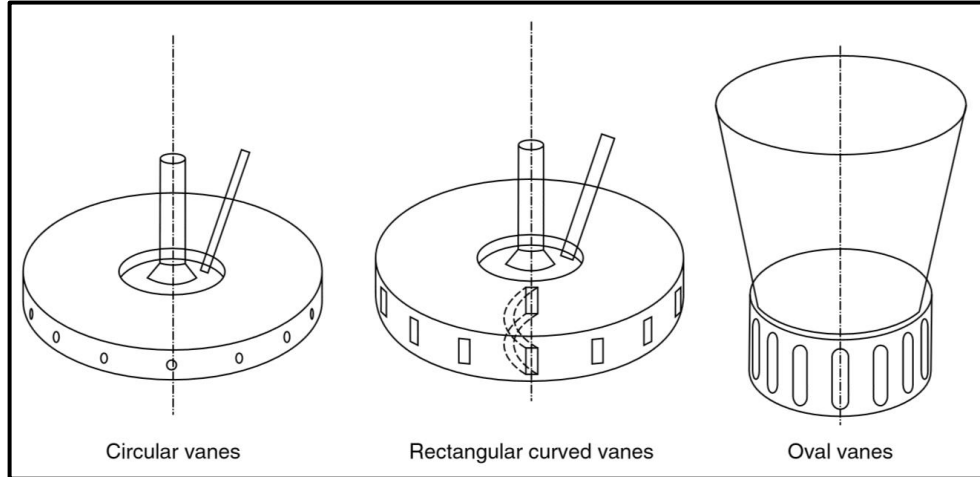
<sup>25</sup> WESTERGAARD, Vagn. Secado Por Atomizacion. Tecnologia De La Leche En Polvo Evaporacion y Secado Por Atomizacion. Copenhague: 2004. 69 p.

<sup>26</sup> WESTERGAARD, Vagn. Ibid. 70 p.

<sup>27</sup> BAYVEL,L. P. y AND ORZECOWSKI,Z. Liquid Atomization. Washington, DC.: Taylor & Francis, 1993.

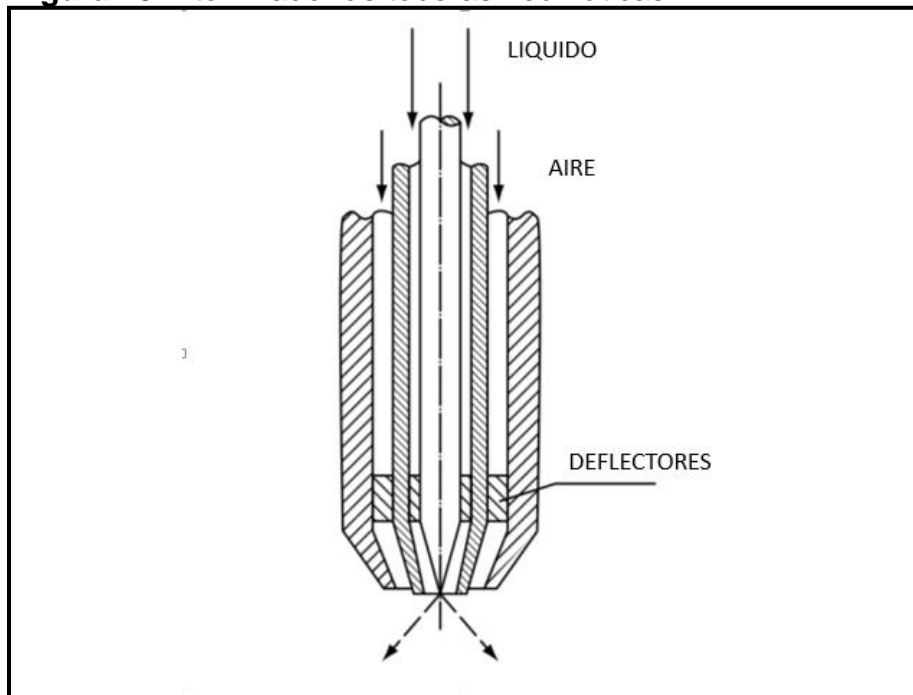
<sup>28</sup> CHEN, Xiao Dong; BHANDARI, Bhesh y PATEL, Kamlesh. Spray Drying of Food Materials. En: [Anónimo] Drying Technologies in Food Processing. Blackwell, 2007. 113 p.

**Figura 9.**Tipos de atomizadores rotatorios.



**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 215.

**Figura 10.** Atomizador de toberas neumáticas.



**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 215.

Con el fin de hacer un comparativo entre los cuatro tipos de atomizadores que se encuentran hoy por hoy en el mercado se construyó el **Cuadro 5** en el que se indicaron las principales características de operación y aplicaciones en procesos de secado haciendo uso de tecnología spray dryer.

**Cuadro 5.** Dispositivos comúnmente utilizados en la atomización.

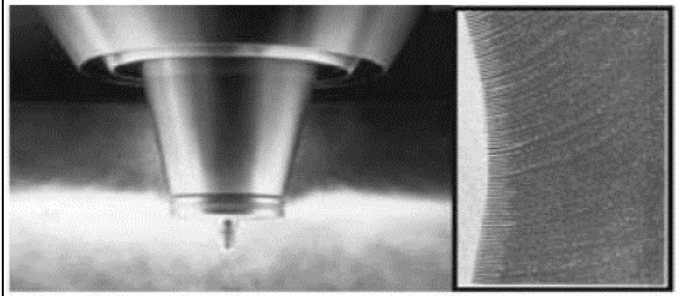
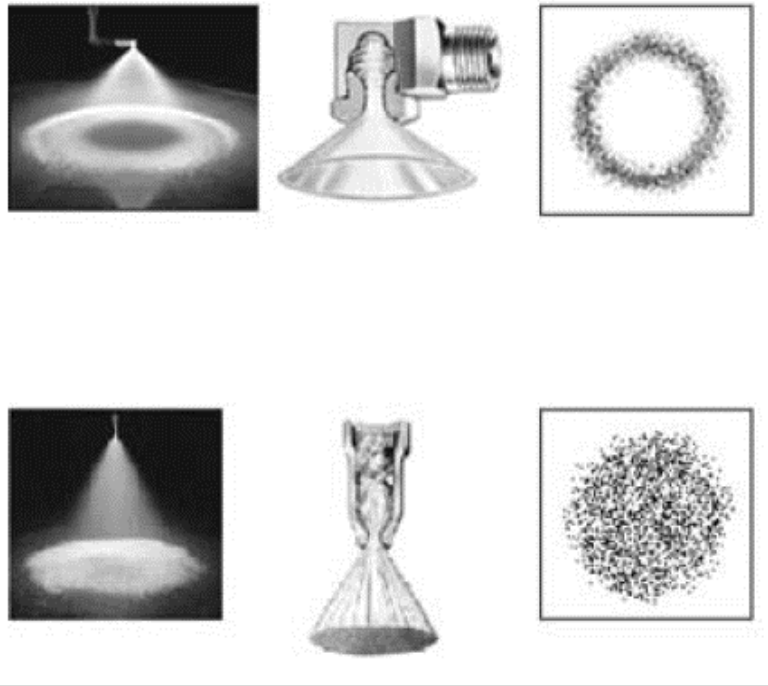
ATOMIZADOR / CARACTERÍSTICAS	ROTATORIO	PRESIÓN	NEUMÁTICO	SÓNICO
<b>DISEÑO</b>	Disco con caminos (circulares, rectangulares, ovalados)	Orificio de 0,4 a 4 mm de diámetro	Entrada de doble fluido, aire-material o vapor-material	Resonancia sónica de alta frecuencia
<b>ENERGÍA</b>	Energía Mecánica: Centrifuga de 5000 - 60000rpm	Energía hidráulica: 10-60Kpa	Energía Cinética: 1-3 Kpa Relación 10-1, Aire-Líquido	Energía Sónica 18-42Khz
<b>ÁNGULO DE TRAYECTORIA</b>	> 120°	5-140°	20-60°	NA
<b>TAMAÑO DE PARTÍCULA</b>	30-120 µm	180-250 µm	20-250 µm	20-250 µm
<b>VENTAJAS</b>	Distribución de tamaño de gotas controlable así como su tamaño con la velocidad del disco - Alta homogeneidad	Bajo consumo - No hay partes móviles - Económico	Entrada de altas viscosidades, abrasivos y materiales gruesos. Permite variaciones en el tamaño de la gota.	Económico
<b>LIMITACIONES</b>	No aptos para cámaras pequeñas.	No excede los 100Lt/h. No son aptos para soluciones altamente concentradas. Puede presentar bloqueo.	La capacidad no excede 1000kg/h de alimentación. Baja homogeneidad. Altos costos de aire comprimido. Costoso. Requiere entrada extra de aire	Aun no se cuenta con completas investigaciones que soporten un escalamiento a nivel industrial. Hecho para laboratorios.
<b>APLICACIÓN</b>	Alimentos	Alimentos	Productos químicos	En desarrollo, secadores pequeños

**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. 215 p.

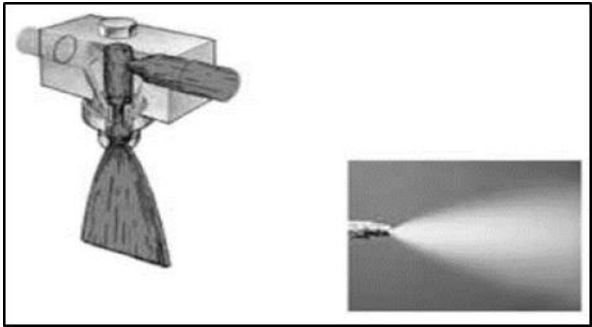
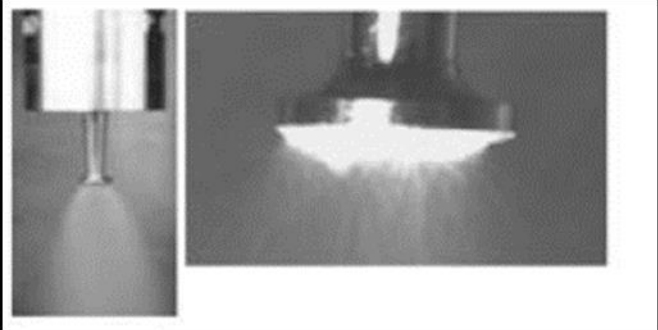
La forma de distribución de las gotas en la cámara de secado es determinada por el patrón de atomización, el cual busca que las gotas no entren en contacto con las paredes de la misma.<sup>29</sup> Véase **Cuadro 6**.

<sup>29</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Op. Cit. p. 121.

**Cuadro 6.** Patrones de atomización.

TIPO DE ATOMIZADOR	PATRON DE ATOMIZACIÓN
<p><b>ROTATORIO</b></p>	
<p><b>TOBERAS DE PRESIÓN</b></p>	

**Cuadro 6. (Continuación).**

TIPO DE ATOMIZADOR	PATRON DE ATOMIZACIÓN
TOBERA NEUMÁTICA	 <p>The image shows a cross-sectional diagram of a pneumatic nozzle on the left, which has a tapered internal passage. To its right is a photograph showing a wide, fan-shaped spray pattern emerging from the nozzle.</p>
ULTRASÓNICO	 <p>The image contains two photographs. The left one shows a narrow, conical spray pattern from a small nozzle. The right one shows a much wider, more uniform, and somewhat flat spray pattern, characteristic of ultrasonic atomization.</p>

**Fuente.** CHEN, Xiao Dong; BHANDARI, Bhesh y PATEL, Kamlesh. Spray Drying of Food Materials. En: [Anónimo] Drying Technologies in Food Processing. Blackwell, 2007. p. 113.

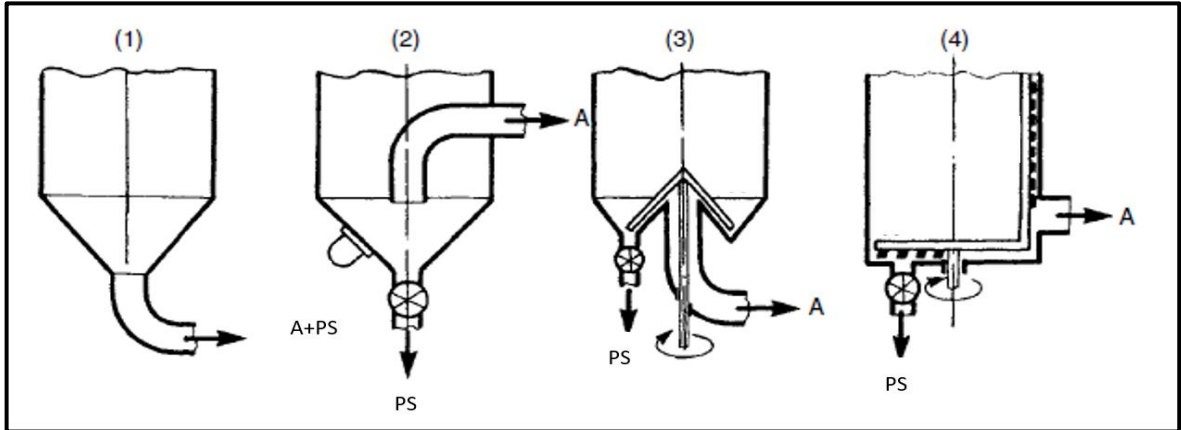
El mayor impacto que se genera en la selección de un atomizador rotatorio o uno de presión es la forma de la cámara de secado; en los rotatorios las cámaras son de gran diámetro pero poca longitud debido al patrón que estos generan, mientras que en los de presión las cámaras son más alargadas y con un diámetro menor

**3.2.2 Cámara de secado.** “La principal función de la cámara de secado es encerrar el spray que se produce y asegurar que las gotas son secadas con el flujo de gas caliente suministrando un tiempo de residencia suficiente para evaporar la humedad.”<sup>30</sup> El material secado cae por efectos de gravedad a la base de la cámara que comúnmente para configuraciones de spray dryer tiene una base cónica de 40°-60°.<sup>31</sup> Sin embargo, esta configuración depende del método de descarga escogido. El proceso se puede observar en la **Figura 11**.

<sup>30</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Op. Cit. p- 76.

<sup>31</sup> CHEN, Xiao Dong; BHANDARI, Bhesh y PATEL, Kamlesh. Op. Cit. p. 51.

**Figura 11.** Ejemplos de sistemas de descarga. A, salida de aire; PS, producto seco.



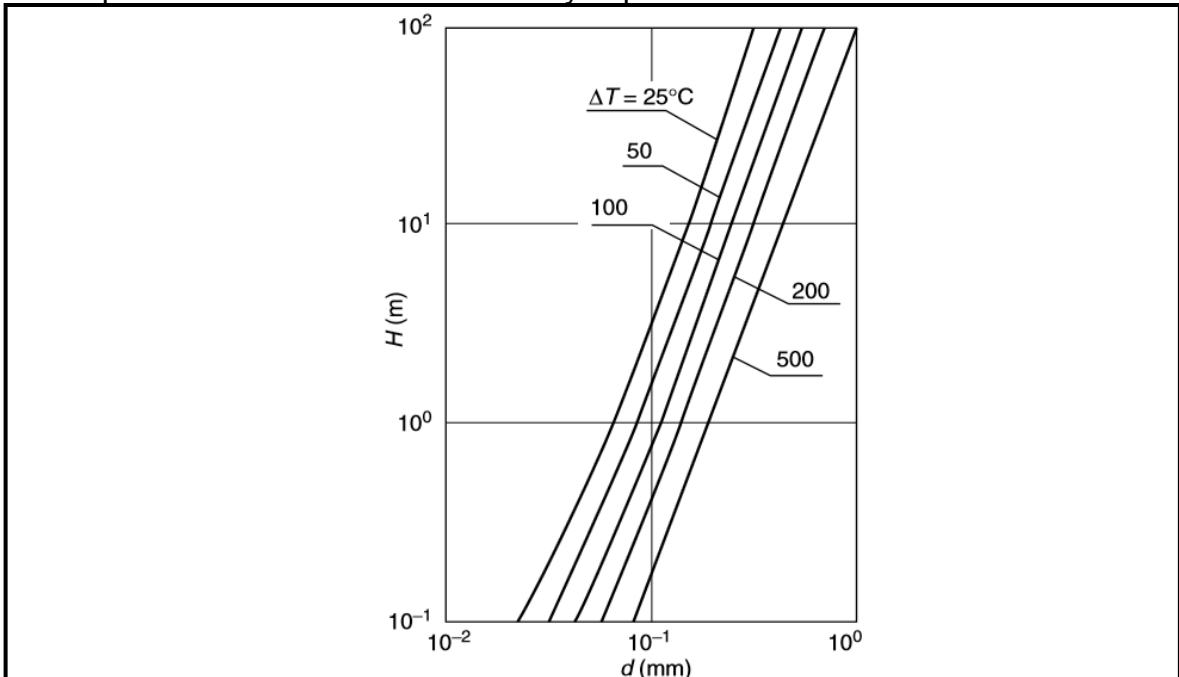
**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 215.

Las propiedades del material a ser secado, la trayectoria de las gotas, el tipo de atomizador, el costo y el tipo de corriente de aire (contra-corriente, a favor o mixto) definen el diseño de la cámara de secado:

La elección del atomizador influye directamente en el dimensionamiento de la cámara de secado ya que la trayectoria de las gotas determina el diámetro de la misma y en consecuencia su altura.<sup>32</sup> La altura de la cámara puede ser determinada por una correlación entre el diferencial de temperaturas entre el aire de secado y el diámetro de la gota, esto se puede determinar a partir de la **Figura 12**.

<sup>32</sup> FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Op. Cit. p. 56.

**Figura 12.** Altura de la cámara de secado  $H$  vs diámetro de gota  $d$ ;  $\Delta t$ , diferencial de temperatura entre el aire de secado y la partícula.



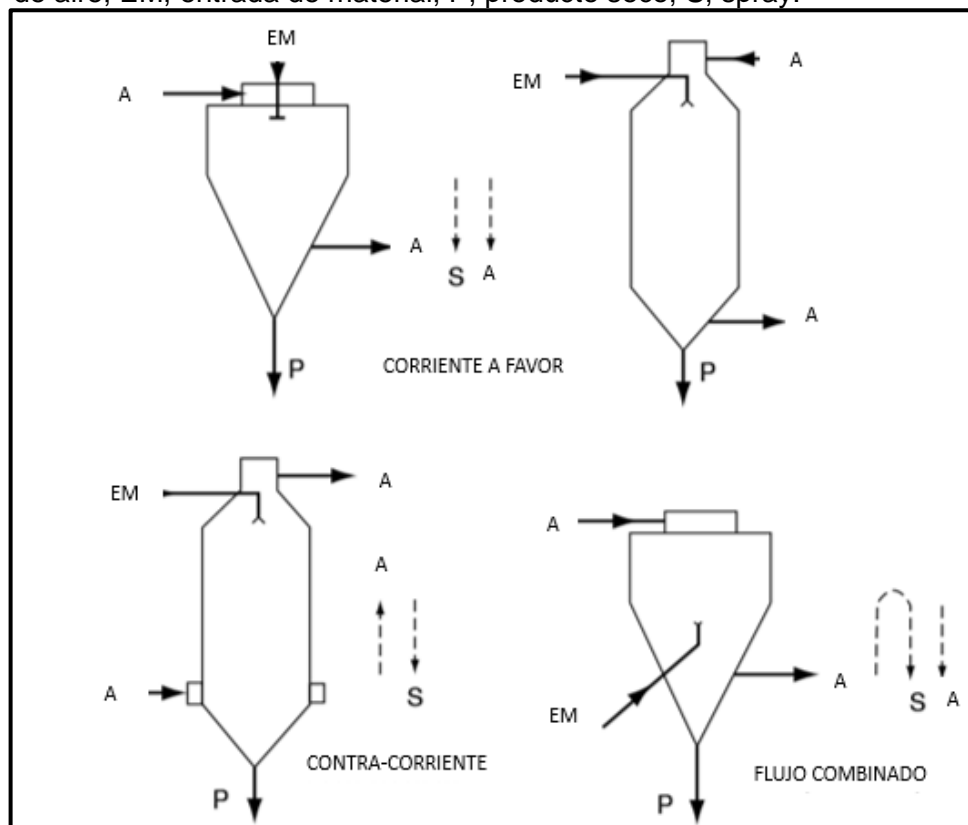
**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 215.

Por otra parte, la trayectoria del medio convectivo (aire) puede entrar en contacto con el producto en gotas de tres posibles formas y se observan en la **Figura 13**<sup>33</sup>.

- **Contra-corriente.** Este tipo de contacto se da cuando el flujo de aire va en dirección contraria al flujo de las gotas, comúnmente utilizado para atomizadores de toberas entregando una alta temperatura en el producto final ya que es empleado para materiales que resisten altas temperaturas.
- **Corriente a favor.** Ocurre cuando el flujo de aire y el material en gotas entran en la misma dirección en la cámara de secado; comúnmente utilizado con atomizadores rotatorios y de toberas. Entrega una baja temperatura en el producto final.
- **Flujo combinado.** Se presenta en ambas trayectorias y es requerido para el secado de productos de altas viscosidades manejando altas temperaturas en el producto final. Particularmente es tenido en cuenta cuando se tiene un tamaño limitado de cámara.

<sup>33</sup> FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Ibid. 215 p.

**Figura 13.** Trayectorias de flujo dentro de la cámara de secado. A, flujo de aire; EM, entrada de material; P, producto seco; S, spray.



**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. 215 p.

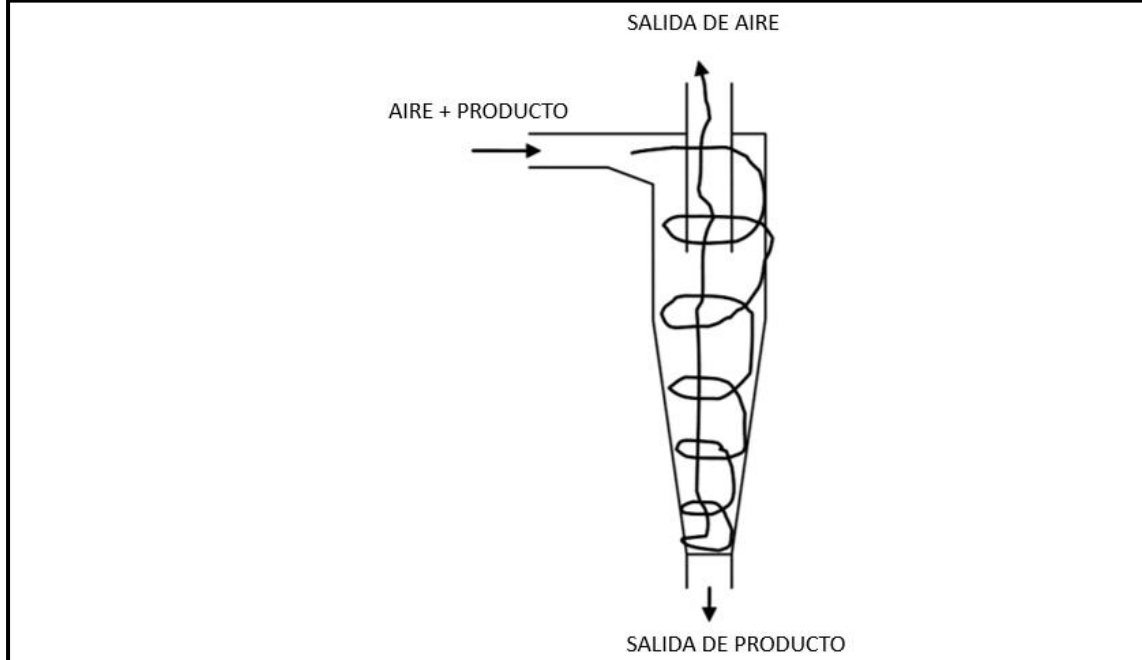
**3.2.3 Sistema de recuperación de producto.** El sistema de recuperación tiene como objetivo separar las partículas secas del aire de secado con la mayor eficiencia posible para evitar pérdidas de material a la atmósfera. La recuperación puede ser realizada mediante separadores por gravedad (ciclones) o por una combinación de separadores por gravedad y filtros. Para sistemas de secado por atomización es común utilizar ciclones.<sup>34</sup>

En los ciclones es utilizada la fuerza centrífuga para mover el material seco alrededor de su eje. El aire y el producto se precipitan a modo de espiral donde por efecto de gravedad caen las partículas en la base cónica que según Mujumdar tiene un ángulo de 10°-20°; posteriormente el aire sube por el ciclón y es liberado. Esto se puede determinar en la **Figura 14.**

<sup>34</sup> CHEN, Xiao Dong; BHANDARI, Bhesh y PATEL, Kamlesh. Op. Cit. 113 p.



**Figura 14.** Trayectoria de aire-producto en el ciclón.



**Fuente.** CHEN, Xiao Dong; BHANDARI, Bhesh y PATEL, Kamlesh. Spray Drying of Food Materials. En: [Anónimo] Drying Technologies in Food Processing. Blackwell, 2007. p. 113.

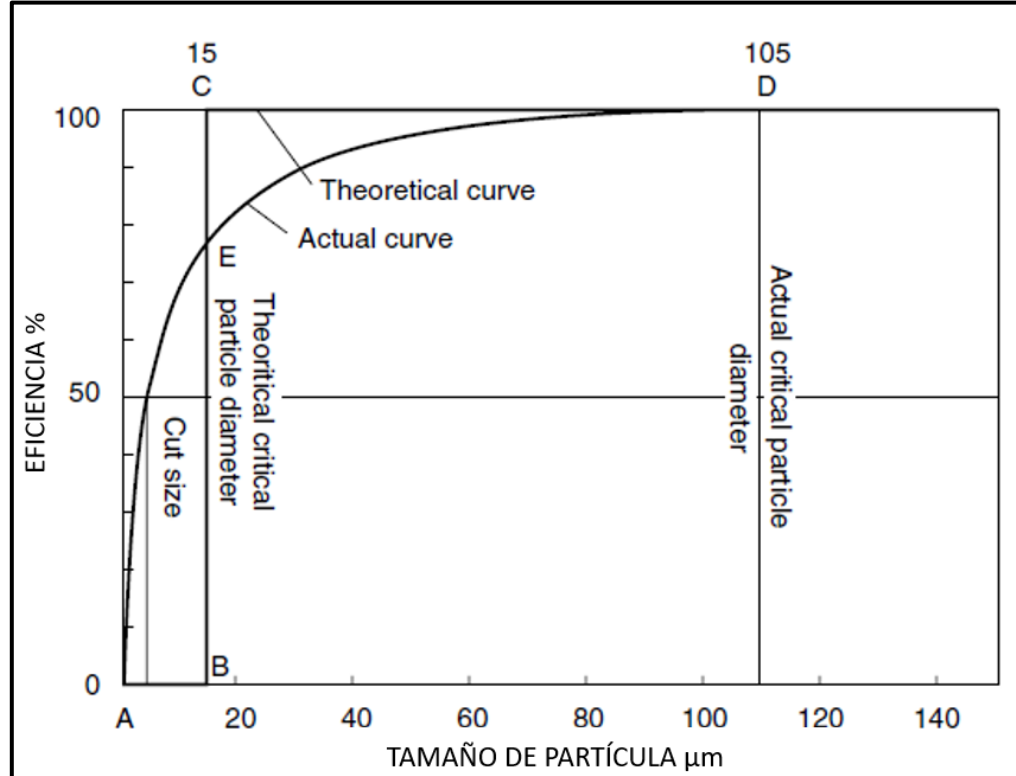
La selección entre un sistema simple o un sistema multiciclón (una configuración en línea de varios ciclones) en procesos de secado por atomización depende de los siguientes factores:<sup>35</sup>

- Características de tamaño de partícula a ser separada.
- Eficiencia general del ciclón.
- Presión de trabajo

Con respecto a la eficiencia del ciclón, esta es calculada a partir del tamaño de partícula. Donde para tamaños de 15  $\mu$ m la eficiencia teórica es 77% mientras que para tamaños de partícula superiores a 105  $\mu$ m la eficiencia teórica es de 100%. Esto se puede evidenciar en la **Figura 15**.

<sup>35</sup> FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Op. Cit. p. 216.

**Figura 15.** Eficiencia del ciclón vs tamaño de partícula.

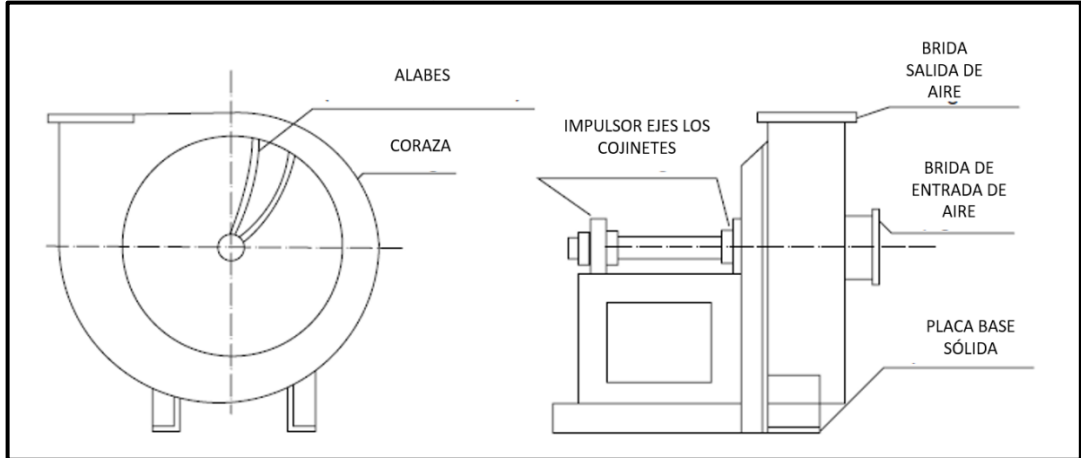


**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 220.

**3.2.4 Sistema de distribución de aire caliente.** Los altos flujos de aire requeridos para los procesos de secado por atomización son obtenidos de ventiladores centrífugos, esto se puede apreciar en la **Figura 16**. Véase figura 20. Por lo general son utilizados sistemas de dos ventiladores en el cual el principal se encuentra ubicado en la salida de aire del ciclón y el secundario en la entrada de aire caliente de la cámara de secado, esto se demuestra en la **Figura 17**<sup>36</sup>.

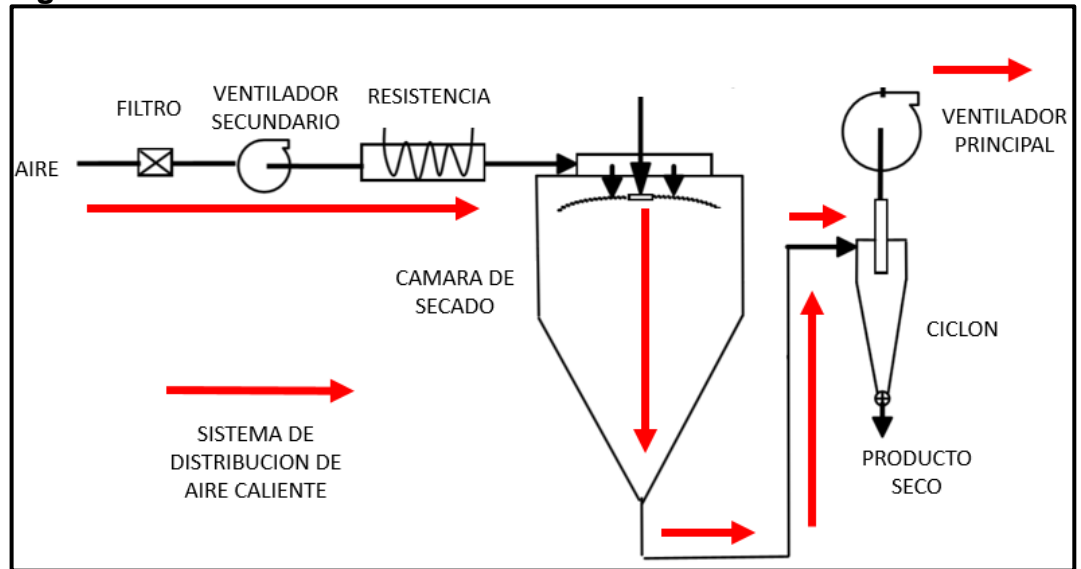
<sup>36</sup> FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns Ibid. p. 223.

**Figura 16.** Ventilador centrifugo.



**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 218.

**Figura 17.** Sistema de distribución de aire caliente.



**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 219.

Las fuentes de calentamiento para el aire de secado se clasifican en la forma de transmisión de calor; directa o indirectamente. Por medio de vapor, gas o aceite caliente (indirectamente); por medio de gas o electricidad (directamente)<sup>37</sup>.

Calentamiento por vapor: la temperatura obtenida es directamente proporcional a la presión de vapor disponible, funciona como un radiador o intercambiador de

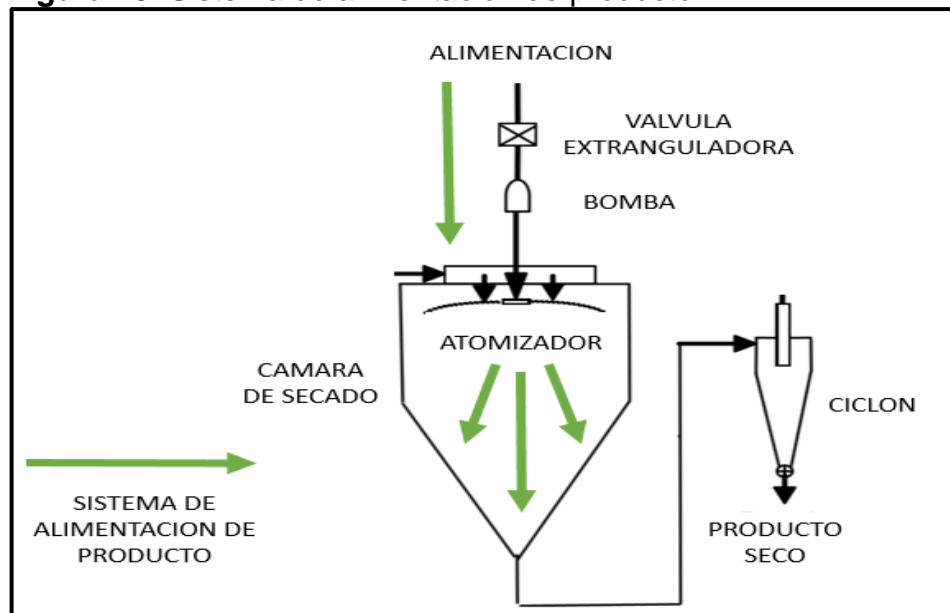
<sup>37</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Op. Cit. p. 218

calor simple de coraza y tubos, normalmente su eficiencia es de 98-99%. Los calentadores a base de aceite o gas tienen flujos separados de aire y gas de combustión con el fin de evitar contaminar el producto a secar con las partículas que se formen debido a la combustión, a temperaturas de 175-250 °C su eficiencia es de 85%<sup>38</sup>.

Por otra parte los calentadores de gas (directos) son utilizados dependiendo del contacto permitido entre el gas y el producto a secar, es barato en el mercado y alcanza temperaturas hasta de 2000°C. Los calentadores eléctricos son comúnmente utilizados para equipos de laboratorio o planta piloto ya que permiten mayor control de temperatura así como también aumentan la seguridad en el proceso, son equipos pequeños y aunque su inversión es baja, los costos de operación son altos. La principal característica de operación para alta eficiencia es que deben estar encendidos mientras exista corriente de aire, de no ser así se puede poner en riesgo el equipo debido a que la temperatura aumenta de manera exponencial<sup>39</sup>.

**3.2.5 Sistema de alimentación.** La alimentación de producto se hace a través de dispositivos mecánicos conocidos como bombas, particularmente para este caso se encargan de impulsar el producto desde el tanque de almacenamiento hasta la entrada al atomizador tal como se ve en la **Figura 18**.

**Figura 18.** Sistema de alimentación de producto.



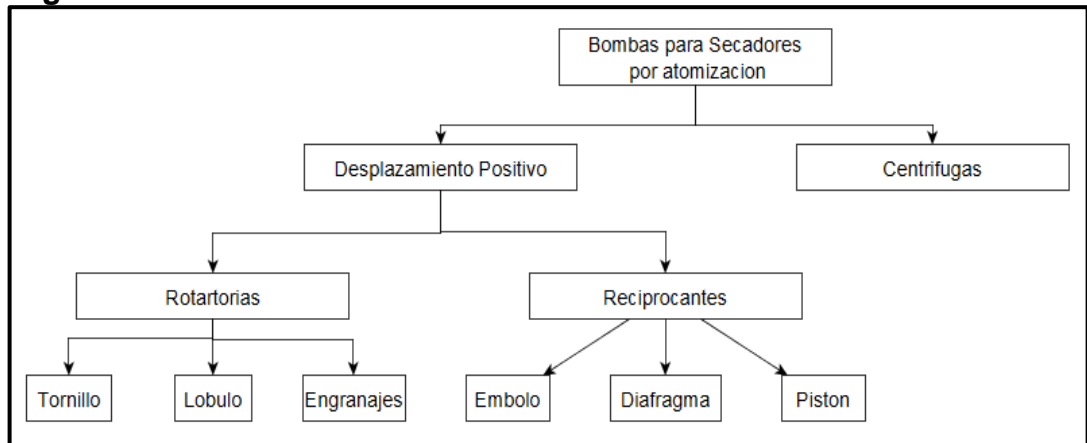
**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 224.

<sup>38</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Ibid. p. 39

<sup>39</sup> YANZA HURTADO, Erik Germán. Ibid. p. 45.

La selección de la bomba se hace de acuerdo a las características del producto a transportar y el tipo de atomizador usado; cuando se usan atomizadores rotatorios o neumáticos comunmente se seleccionan bombas de baja presión que satisfacen la demanda de producto. Cuando se usan atomizadores de presión se requiere la selección de bombas de alta presión. Las bombas se clasifican de acuerdo a su funcionamiento, esto se puede apreciar en la **Figura 19**.

**Figura 19.** Clasificación de bombas.



**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 481 p. ISBN 0-470-21743-X.

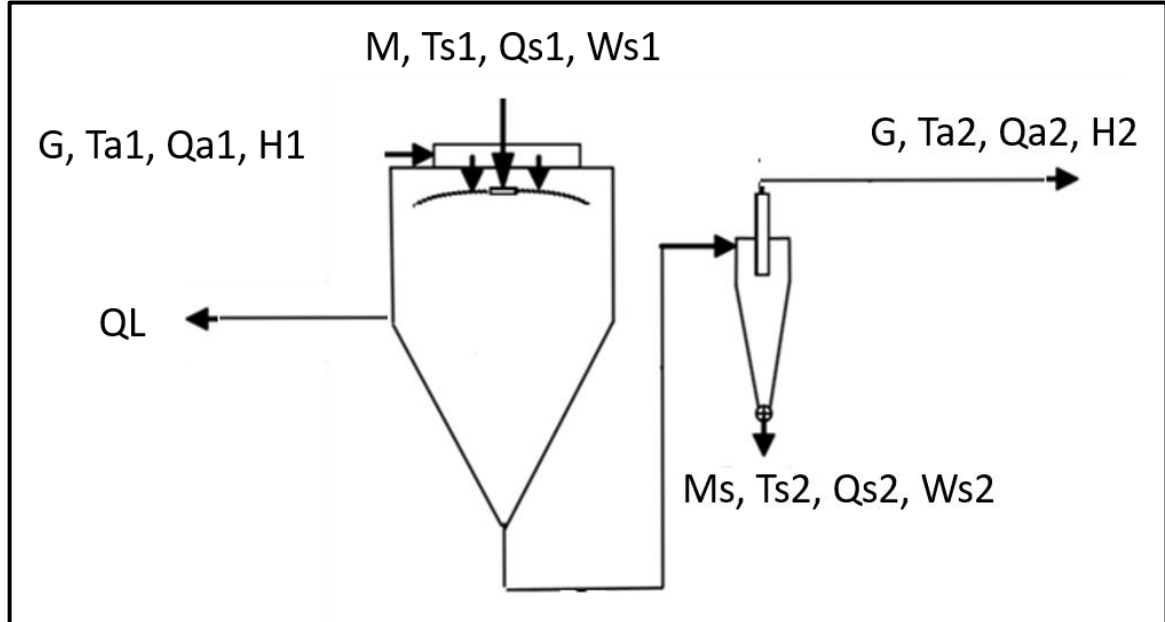
Principalmente las bombas de tornillo cumplen con la mayoría de requerimientos en aplicaciones de baja presión; son utilizadas exitosamente para bombear productos como miel, tomate y productos farmacéuticos hacia atomizadores rotatorios. Por otra parte las bombas de engranajes son utilizadas para bombear pastas espesas. Las bombas de diafragma se utilizan en el transporte de lechadas con grandes contenidos de sólidos irregulares. Mientras que las bombas centrifugas son utilizadas en el bombeo de lechadas o soluciones. Finalmente, las bombas de pistón y las de émbolo son utilizadas para transportar producto hacia atomizadores de presión.

### 3.3 BALANCE DE ENERGIA Y MASA EN UN SECADOR SPRAY DRYER

Para poder determinar el flujo de aire requerido para el secado se realizó el balance de masa y energía en el cual para operaciones con flujo continuo la masa de aire y el producto a la entrada equivale a la masa de aire y el producto a la salida, por otra parte, la energía (en este caso en forma de calor) de la entrada es equivalente a la energía de la salida más las pérdidas (radiación de energía en forma de calor en la cámara de secado)<sup>40</sup>. El cual se puede observar en **Figura 20**.

<sup>40</sup> MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 720 p. ISBN 0-470-21743-X

**Figura 20.** Balance de masa y energía en un secador spray dryer.



A continuación en el **Cuadro 7** se describen las variables que se utilizaron en el balance de masa y energía para determinar el flujo de aire requerido para el diseño del secador.

**Cuadro 7.** Nomenclatura Balance de Masa y Energía.

<b>M</b>	(Kg/h)	Flujo de producto
<b>Ts1</b>	(°C)	Temperatura del producto (Entrada)
<b>Qs1</b>	(Kcal/Kg)	Entalpía del producto (Entrada)
<b>Ws1</b>	(Kg/Kg)	Humedad producto (Entrada)
<b>G</b>	(Kg/h)	Flujo aire caliente
<b>Ta1</b>	(°C)	Temperatura aire (Entrada)
<b>Qa1</b>	(Kcal/Kg)	Entalpía del aire (Entrada)
<b>H1</b>	(Kg/Kg)	Humedad aire (Entrada)
<b>Ta2</b>	(°C)	Temperatura aire (Salida)
<b>Qa2</b>	(Kcal/Kg)	Entalpía del aire (Salida)
<b>H2</b>	(Kg/Kg)	Humedad aire (Salida)
<b>Ms</b>	(Kg/h)	Flujo de producto (Seco)
<b>Ts2</b>	(°C)	Temperatura del producto (Salida)
<b>Qs2</b>	(Kcal/Kg)	Entalpía del producto (Salida)
<b>Ws2</b>	(Kg/Kg)	Humedad producto (Salida)
<b>QL</b>	(Kcal/h)	Calor perdido en la cámara de secado

Para determinar el balance de masa se utiliza la ecuación general de conservación de la energía, la cual se detalla en la **Ecuación 1**.

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

Entonces,

### **Ecuación 1. Balance de Masa.**

$$M(Ws1) + G(H1) = Ms(Ws2) + G(H2)$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde:

$M(Ws1)$  = Es la humedad del producto a la entrada expresada en Kg/h.

$G(H1)$  = Es la humedad en el aire de secado a la entrada expresada en Kg/h.

$Ms(Ws2)$  = Es la humedad del producto a la salida expresada en Kg/h.

$G(H2)$  = Es la humedad en el aire de secado a la salida expresada en Kg/h.

En el desarrollo del balance de energía es tomada en cuenta la ecuación general de conservación de la energía en la cual se tienen en cuenta las pérdidas del sistema como se observa en la **Ecuación 2**. Para el cálculo de las entalpías del producto y del aire, el punto de congelamiento del agua es usado como referencia de temperatura (0°C).<sup>41</sup>

$$\text{Energía a la Entrada} = \text{Energía a la Salida} + \text{Pérdidas}$$

Entonces,

### **Ecuación 2. Balance de energía.**

$$G(Qa1) + M(Qs1) = G(Qa2) + Ms(Qs2) + QL$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde para el cálculo,

### **Ecuación 3. Entalpía del aire.**

$$Qa = Cs\Delta T + H\lambda$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde,

$\Delta T$  = Es la diferencia de temperaturas entre el aire y el punto de congelamiento del agua.

---

<sup>41</sup>MASTER, Keith. Ibid. p. 720.

$\lambda$  = Es el calor latente de vaporización del agua en el punto de congelamiento y a presión atmosférica (597,3 Kcal/Kg).

$C_s$ : Es el calor húmedo expresado en (Kcal/kg aire seco °C) y es calculado con la siguiente ecuación:

**Ecuación 4. Calor Húmedo.**

$$C_s = 0,24 + 0,46H1$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Luego,

**Ecuación 5. Entalpia del crudo de almidón.**

$$Q_s = C_{ds}\Delta T + W_s C_w \Delta T$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde,

$C_{ds}$  = Es la capacidad calorífica del sólido seco (almidón de quinua) expresado en (Kcal/Kg°C).

$C_w$  = Es la capacidad calorífica de la humedad en forma líquida (Agua), 1.000765 (Kcal/Kg°C).

Finalmente,

**Ecuación 6. Calor cedido por la cámara.**

$$Q_L = UA\Delta T$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

$U$  = Coeficiente de transferencia de calor del material en el que es fabricada la cámara de secado (Kcal/hm<sup>2</sup> °C).

$A$  = Es el área superficial de la cámara de secado (m<sup>2</sup>).

$\Delta T$  = Es la diferencia entre la temperatura con la que sale el aire de secado y la temperatura del ambiente.

### 3.4 DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS

El proceso de secado por medio de la tecnología spray dryer se organiza en



**3.4.1 Atomizador.** Para el diseño de un secador tipo spray dryer orientado a la obtención de almidón de quinua se recomienda el uso de un atomizador rotatorio el cual puede generar partículas finas, medias y gruesas, mientras que los de presión son comúnmente utilizados para producción de partículas gruesas<sup>42</sup>. El tamaño de la gota generada por un rotatorio se describe con la siguiente ecuación:

**Ecuación 7.** Diámetro de la gota.

$$D = r \left[ 0,4 \left( \frac{M}{N_V b \rho_w N r^2} \right)^{0,6} \left( \frac{N_V \mu b}{M} \right)^{0,2} \left( \frac{\sigma b^3 \rho_w N_V^3}{M^2} \right)^{0,1} \right]$$

**Fuente.** FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. p. 215.

Donde,

$D$  = Diámetro de la gota (m).

$r$  = Diámetro del atomizador (m).

$M$  = Flujo másico del producto (Kg/s).

$N_V$  = Número de venas del atomizador.

$b$  = Altura de las venas (m).

$\rho_w$  = Densidad de la gota (Kg/m<sup>3</sup>).

$N$  = Velocidad de rotación (rps).

$\mu$  = Viscosidad del fluido (Pa\*s).

$\sigma$  = Tensión superficial del fluido (N/m).

Durante el proceso de atomización, las gotas presentan una trayectoria, la cual es clave para el dimensionamiento de la cámara de secado. El desplazamiento horizontal máximo de la gota es descrito con la siguiente ecuación:

**Ecuación 8.** Desplazamiento horizontal máximo de la gota.

$$S_{h(max)} = \frac{D^2 \rho_w U_h}{18 \mu_a}$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde,

$S_{h(max)}$  = Es el desplazamiento horizontal máximo (m)

$D$  = Diámetro de la gota (m)

$\rho_w$  = Densidad de la gota (Kg/m<sup>3</sup>)

$U_h$  = Velocidad horizontal (m/s)

<sup>42</sup> MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 66 p. ISBN 0-470-21743-X.

$\mu_a$  = Viscosidad del aire (Pa\*s)

Para el cálculo de la velocidad horizontal se requiere el número de Reynolds, ésta está descrita con la siguiente ecuación:

**Ecuación 9.** Velocidad Horizontal.

$$U_h = R_e \left( \frac{\mu_a}{D\rho_a} \right)$$

**Fuente.** MASTER,Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde,

$R_e$  = Es el número de Reynolds.

$\mu_a$  = Viscosidad del aire (Pa\*s).

$D$  = Diámetro de la gota (m).

$\rho_a$  = Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>).

El número de Reynolds es calculado con la **Ecuación 10.**

**Ecuación 10.** Número de Reynolds.

$$R_e = \frac{DV_T\rho_a}{\mu_a}$$

**Fuente.** MASTER,Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

**Ecuación 11.** Velocidad tangencial.

$$V_T = \pi r N$$

**Fuente.** MASTER,Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde,

$V_T$ : Velocidad tangencial de la gota a la salida del atomizador (m/s). Ver figura 25.

$r$ : Diámetro del atomizador (m).

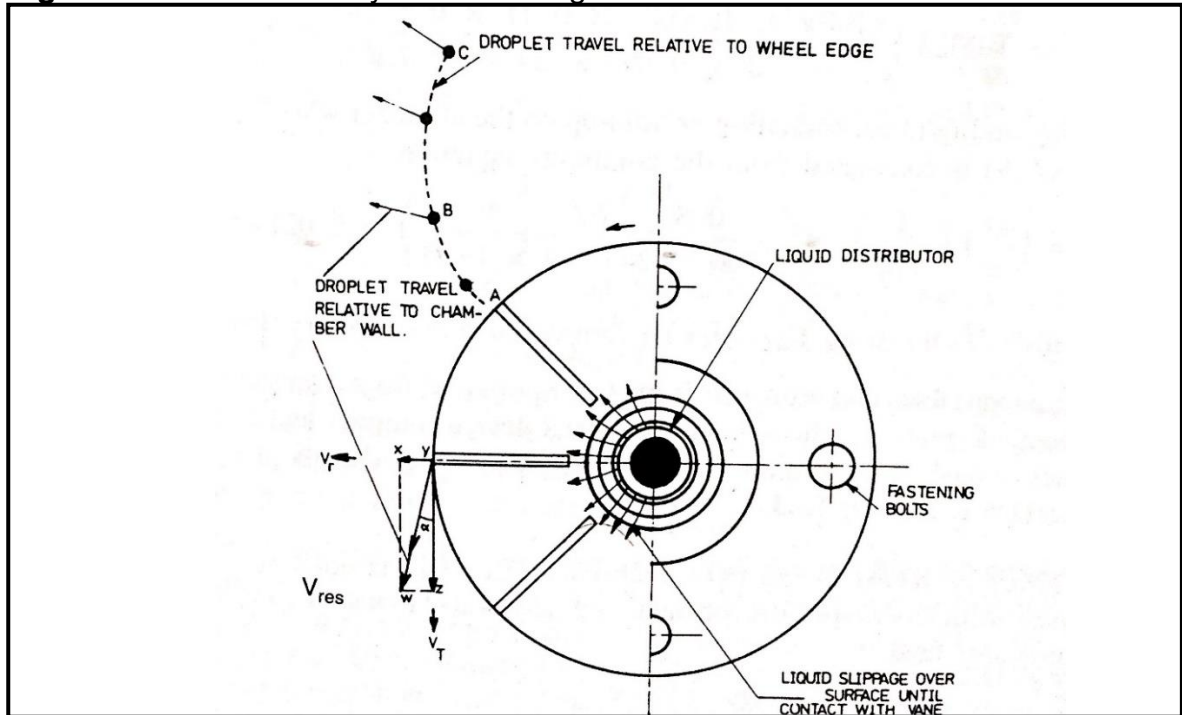
$N$ : Velocidad de rotación (rps).

$D$ : Diámetro de la gota (m).

$\rho_a$ : Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_a$ : Viscosidad del aire (Pa\*s)

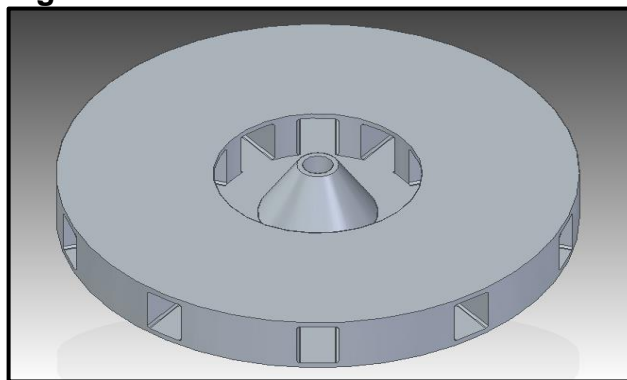
**Figura 21.** Análisis de trayectoria de la gota a la salida de un atomizador rotatorio.



**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

En la **Figura 22** se puede ver un modelo de atomizador rotatorio comúnmente utilizado en el spray de alimentos:

**Figura 22.** Modelo de atomizador rotatorio.



**3.4.2 Cámara de secado.** Para el diseño de la cámara de secado es importante tener en cuenta la dirección del flujo (Figura 13). Para operaciones de secado que requieren bajas temperaturas debido a posibles comportamientos del producto a secar, se recomienda el uso de flujos a favor de corriente<sup>43</sup>.

<sup>43</sup> MASTER, Keith. Ibid. p. 173.

Con respecto al tiempo de permanencia del aire de secado en la cámara debe ser seleccionado de acuerdo a los siguientes criterios:

**Cuadro 8.** Parámetros para la elección del tiempo de secado.

TIEMPO DE RESIDENCIA	DURACIÓN (SEG)	RECOMENDADO PARA
CORTO	10-20 s	Para obtener partículas finas de productos no sensibles al calor, aquellos fáciles de secar con contenido de humedad en la superficie. No higroscópicos.
MEDIO	20-35 s	Para obtener partículas finas y semigruesas (tamaños por debajo de 180 micras) a partir de productos aglomerados tanto sensitivos como resistentes al calor. Cuando se requiere un bajo % de humedad en el producto final. Secado para productos higroscópicos.
LARGO	35 s en adelante	Para obtener partículas gruesas (tamaños promedio de 200-275 micras), usado para dejar bajo contenido de humedad y se usa para operaciones a bajas temperatura a partir de productos sensitivos al calor.

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 174 p. ISBN 0-470-21743-X.

Por otro lado, para la elección de las temperaturas de entrada y de salida del aire de secado de la cámara es importante tener en cuenta los siguientes criterios:

*Para la temperatura de entrada, seleccionar el mayor valor entre:*

- *Calor sensible del producto.*
- *Efecto del calor en la estructura química (calor de degradación / descomposición).*
- *Límites de explosión y temperatura segura del producto.*

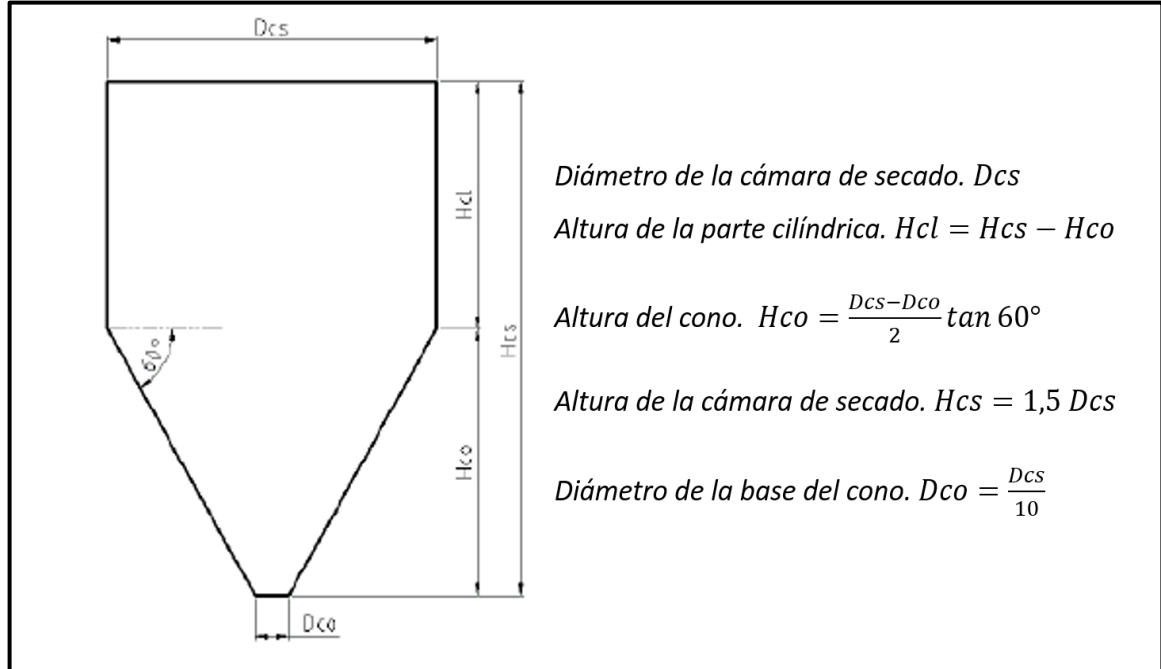
*Para la temperatura de salida, seleccionar el menor valor entre:*

- *Contenido de humedad requerido en el producto seco.*
- *Temperatura para lograr la descarga continua del producto.*<sup>44</sup>

El dimensionamiento de la cámara de secado está determinado por el desplazamiento horizontal máximo que tenga a gota a la salida del atomizador. Las dimensiones guardan una relación geométrica que se pueden ver en la **Figura 23**.

<sup>44</sup> MASTER, Keith. Ibid. p. 175.

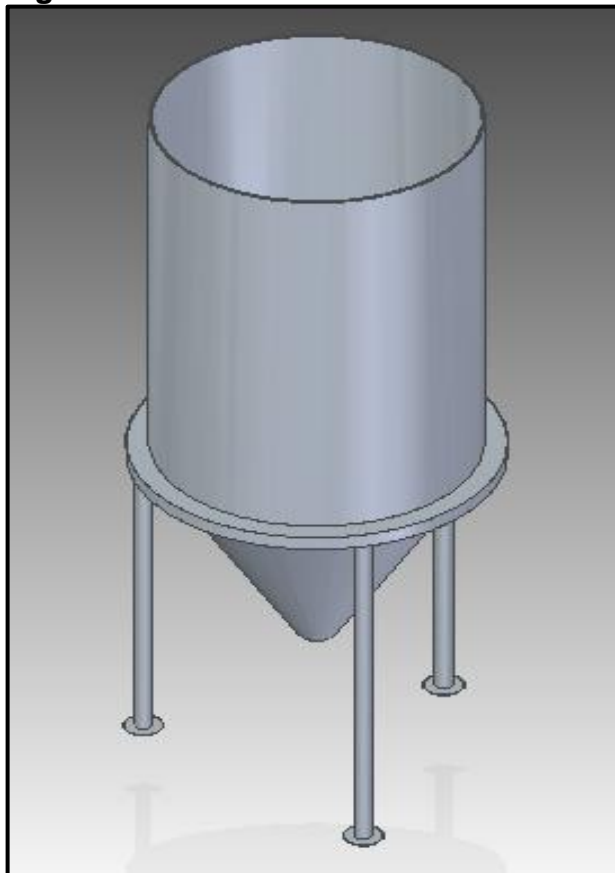
**Figura 23.** Dimensiones de la cámara de secado.



**Fuente.** YANZA HURTADO, Erik Germán. Diseño De Un Secador Por Atomización a Nivel Piloto Para Jugo Concentrado De Tomate De Árbol. Sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química Ingeniería Química: Universidad Nacional, 2003.

En la **Figura 24** se puede ver un modelo de cámara de secado propuesto por los autores.

**Figura 24.** Modelo de cámara de secado.



**3.4.3 Ciclón.** El dimensionamiento del ciclón obedece a unas relaciones geométricas con respecto al diámetro del cuerpo ( $D_c$ ) las cuales se muestran en la **Figura 25**.

Para el cálculo del diámetro del cuerpo ( $D_c$ ) se debe seguir el siguiente paso a paso:

1. Tener en cuenta el flujo volumétrico de aire de secado, el cual se determina a partir del flujo másico de aire obtenido en la sección 3.2 Balance de energía y masa. Éste se refiere a la relación entre el flujo másico y la densidad del aire expresado en  $m^3/s$ :

**Ecuación 12.** Flujo volumétrico de aire de secado.

$$Gv = \frac{G}{\rho a}$$

**Fuente.** MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 203 p. ISBN 0-470-21743-X.

Donde,

$Gv$  Flujo volumétrico de aire de secado ( $m^3/s$ ).

$G$  Flujo másico de aire de secado ( $Kg/s$ ).

$\rho a$  Densidad del aire ( $Kg/m^3$ )

2. A continuación se debe seleccionar la velocidad de entrada de producto más aire de secado al ciclón teniendo en cuenta que puede variar de 15,2 a 27,4 m/s, aunque no es requisito alinearse con este rango, es recomendado para lograr eficiencias altas en el proceso de recuperación de producto.<sup>45</sup>

3. Luego, se determina el área del ducto de entrada (Área  $ab$ ) expresada en  $m^2$ :

**Ecuación 13.** Área del ducto de entrada.

$$Área\ ab = \frac{Gv}{Vi}$$

**Fuente.** ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. Diseño Optimo de Ciclones. En: REVISTA INGENIERIAS. julio-diciembre. vol. 5, p. 123

Donde,

Área  $ab$  Área del ducto de entrada ( $m^2$ ).

$Gv$  Flujo volumétrico de aire de secado ( $m^3/s$ ).

$Vi$  Velocidad entrada de producto más aire al ciclón ( $m/s$ ).

4. Finalmente se calcula el diámetro del cuerpo  $Dc$  expresado en m:

**Ecuación 14.** Diámetro del cuerpo.

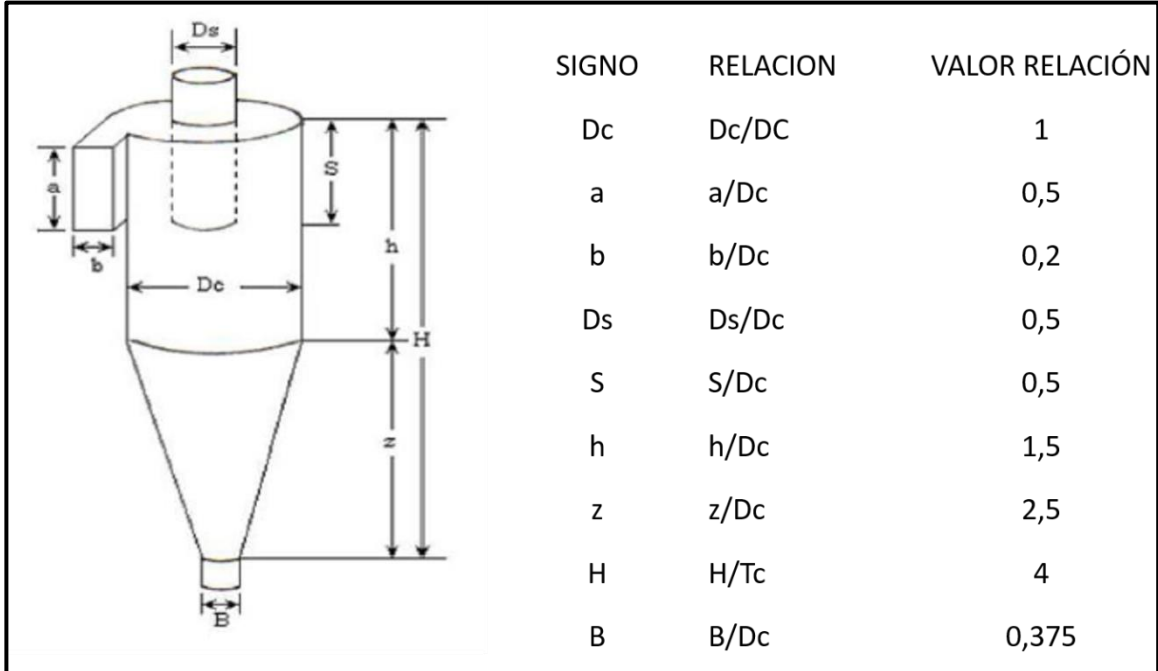
$$Dc = \sqrt{\frac{Área\ ab}{0,5 * 0,2}}$$

**Fuente.** ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. Diseño Optimo de Ciclones. En: REVISTA INGENIERIAS. julio-diciembre. vol. 5, p. 123

---

<sup>45</sup> ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. Diseño Optimo de Ciclones. En: REVISTA INGENIERIAS. julio-diciembre. vol. 5, p. 123

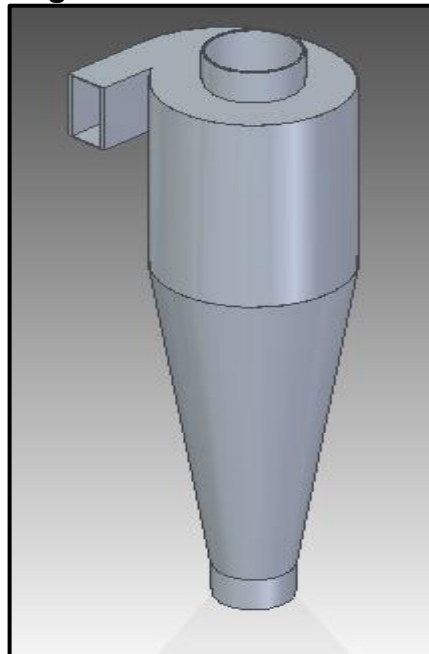
**Figura 25.** Dimensiones de un ciclón.



**Fuente.** ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. Diseño Optimo de Ciclones. En: REVISTA INGENIERIAS. julio-diciembre. vol. 5, p. 123.

En la **Figura 26** se puede ver un modelo del ciclón propuesto por los autores.

**Figura 26.** Modelo de ciclón.





## 4. HOJA DE CÁLCULO Y ESQUEMAS

La hoja de cálculo hecha por los autores corresponde a un libro de Excel que permite el dimensionamiento de los componentes principales de un equipo secador tipo spray dryer a escala de laboratorio; los componentes son, la cámara de secado y el ciclón. Adicionalmente permite determinar el tamaño de partícula obtenido a partir del atomizador sugerido así como también los flujos másicos de producto a secar y aire de secado requeridos.

El libro se compone de cinco hojas tituladas: Diseño de un secador spray, balance flujo co-corriente, atomizador, cámara de secado y ciclón.

### 4.1 DISEÑO DE UN SECADOR SPRAY

En la **Figura 27** se muestra la primera hoja que compone el libro. Diseño de un secador spray, en la cual se deben ingresar los datos en tres etapas, datos del producto a secar, los datos del aire de secado y los datos recomendados para el diseño de equipos.

En la primera etapa, los datos del producto a secar, corresponden en este caso a la caracterización que se debe hacer previamente al crudo de almidón para poder dimensionar un equipo de secado.

A modo de ejemplo se indicó que se requiere un flujo de salida, es decir la cantidad que se pretende obtener de producto seco de 5 kg/h a partir de una solución con humedad de 96% y sólidos suspendidos de 4% con respecto a su masa.

Figura 27. Libro de cálculo.

## HOJA DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE UN SECADOR POR ATOMIZACIÓN ESCALA BANCO

En este documento se encuentran los cálculos necesarios para el dimensionamiento de los principales equipos para el proceso de secado por atomización. En los siguientes cuadros debe ingresar los valores solicitados en las unidades especificadas. Para ver el diseño obtenido, debe navegar por las siguientes hojas.

### DATOS DE DISEÑO DE EQUIPOS (RECOMENDADOS POR LOS AUTORES)

Coefficiente de transferencia de calor	U	2 Kcal/hm <sup>2</sup> C
Diámetro del atomizador	r	0,1 m
Altura de las venas	b	0,008 m
Numero de venas	Nv	30 -
Velocidad de entrada al ciclón	Vi	27,4 m/s
Calor latente de vaporización del agua 0°C	λ	597,3 Kcal/kg
velocidad de rotacion atomizador	N	10000 RPM

### DATOS DEL PRODUCTO A SECAR

Flujo salida deseado	Ms	5 Kg/h
Humedad (entrada)	Ws1	55 %
Solidos en el producto (entrada)		45 %
Humedad deseada (salida)	Ws2	4 %
Solidos en el producto seco (salida)		96 %
Temperatura (entrada)	Ts1	5 °C
Temperatura (salida)	Ts2	50 °C
Capacidad calorifica solidos	CDs	0,2099 kcal/kg°C
Capacidad calorifica de la humedad liquida	Cw	1 kcal/kg°C
Densidad de la mezcla	ρ <sub>w</sub>	1000 kg/m <sup>3</sup>
Tensión superficial de la mezcla	σ	0,0749 N/m
Viscosidad de la mezcla	μ	0,016 Pa s

### DATOS DEL AIRE DE SECADO

Humedad aire (entrada)	H1	0,005 kg/kg
Temperatura aire (entrada)	Ta1	100 °C
Temperatura aire (salida)	Ta2	60 °C
Temperatura ambiente	Tamb	20 °C
Densidad del aire	ρ <sub>a</sub>	1,092 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad del aire	μ <sub>a</sub>	0,0000195 Pa s

←
DISEÑO DE UN SECADOR SPRAY
BALACE FLUJO CO-CORRIENTE
ATOMIZADORES
CÁMARA DE SECADO
CICLON
+
⏪
⏩

A continuación se indicaron las temperaturas de operación, que la solución entra a una temperatura de 5°C y sale a 50°C y finalmente se ingresaron los datos correspondientes a las propiedades fisicoquímicas de la solución a partir de la cual se desea obtener el producto seco, así como se ve en la **Figura 28**.

**Figura 28.** Especificaciones del producto a secar.

DATOS DEL PRODUCTO A SECAR		
Flujo salida deseado	$M_s$	5 Kg/h
Humedad (entrada)	$W_{s1}$	94 %
Solidos en el producto (entrada)		6 %
Humedad deseada (salida)	$W_{s2}$	10 %
Solidos en el producto seco (salida)		90 %
Temperatura (entrada)	$T_{s1}$	5 °C
Temperatura (salida)	$T_{s2}$	50 °C
Capacidad calorífica solidos	$C_{Ds}$	0,2099 kcal/kg°C
Capacidad calorífica de la humedad líquida	$C_w$	1 kcal/kg°C
Densidad de la mezcla	$\rho_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Tensión superficial de la mezcla	$\sigma$	0,0749 N/m
Viscosidad de la mezcla	$\mu$	0,016 Pa s

En la segunda etapa, se ingresaron los datos del aire a 100°C indicando que ésta es la temperatura de entrada y que se busca que el aire salga a 60°C, así como también la temperatura del ambiente asumida a 20°C. Tal como se ve en la **Figura 29**.

**Figura 29.** Especificaciones del aire a secar.

DATOS DEL AIRE DE SECADO		
Humedad aire (entrada)	$H_1$	0,005 kg/kg
Temperatura aire (entrada)	$T_{a1}$	100 °C
Temperatura aire (salida)	$T_{a2}$	60 °C
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	20 °C
Densidad del aire	$\rho_a$	1,092 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad del aire	$\mu_a$	0,0000195 Pa s

Finalmente en la tercera etapa la cual se muestra en la **Figura 30** se indicaron datos de diseño recomendados de acuerdo a la revisión bibliográfica con el fin de lograr mayor eficiencia en el funcionamiento del secador.

**Figura 30.** Especificaciones del diseño de los equipos.

DATOS DE DISEÑO DE EQUIPOS (RECOMENDADOS POR LOS AUTORES)		
Coefficiente de transferencia de calor	U	2 Kcal/hm <sup>2</sup> °C
Diámetro del atomizador	r	0,1 m
Altura de las venas	b	0,008 m
Numero de venas	Nv	30 -
Velocidad de entrada al ciclón	Vi	27,4 m/s
Calor latente de vaporización del agua 0°C	$\lambda$	597,3 Kcal/kg
velocidad de rotación atomizador	N	10000 RPM

#### 4.2 BALANCE FLUJO CO-CORRIENTE.

En la **Figura 31** se muestra la segunda hoja que compone el libro. Balance flujo co-corriente en la cual se hicieron los cálculos correspondientes al balance de masa y energía.

A partir del balance se logró identificar el flujo de aire requerido para el secado de la solución propuesta, 4515.57 Kg/h y el flujo másico de solución requerida para obtener el flujo de producto seco deseado indicado en la primera hoja del documento de Excel (Diseño de secador spray), 75 Kg/h. Como se pudo observar, se requieren flujos másicos de aire y solución bastante altos, puesto que al realizar un nuevo ejercicio, asumiendo los mismos parámetros de entrada, pero esta vez indicando que la solución se encuentra a una humedad de 60% y sólidos en suspensión de 40% con respecto a su masa se determinó que los flujos variaron notablemente; 413.31 Kg/h y 11.25 Kg/h de flujo másico de aire de secado y solución respectivamente así como se ve en la **Figura 32**.

4.3 Atomizadores. En la **Figura 33** se muestra la tercera hoja que compone el libro. Atomizadores, en la cual se hicieron los cálculos correspondientes al tamaño de la partícula así como también el desplazamiento horizontal máximo de la gota teniendo en cuenta no solo las propiedades de la solución a secar indicadas para el primer ejemplo sino también las características del atomizador sugerido de acuerdo a la revisión bibliográfica hecha.

Se calculó entonces que para la solución propuesta con 94% de humedad, el tamaño de la gota es de 53.09  $\mu\text{m}$  y el desplazamiento horizontal máximo de ésta es de 0.43 m.

Figura 31. Especificaciones del balance de masa y energía.

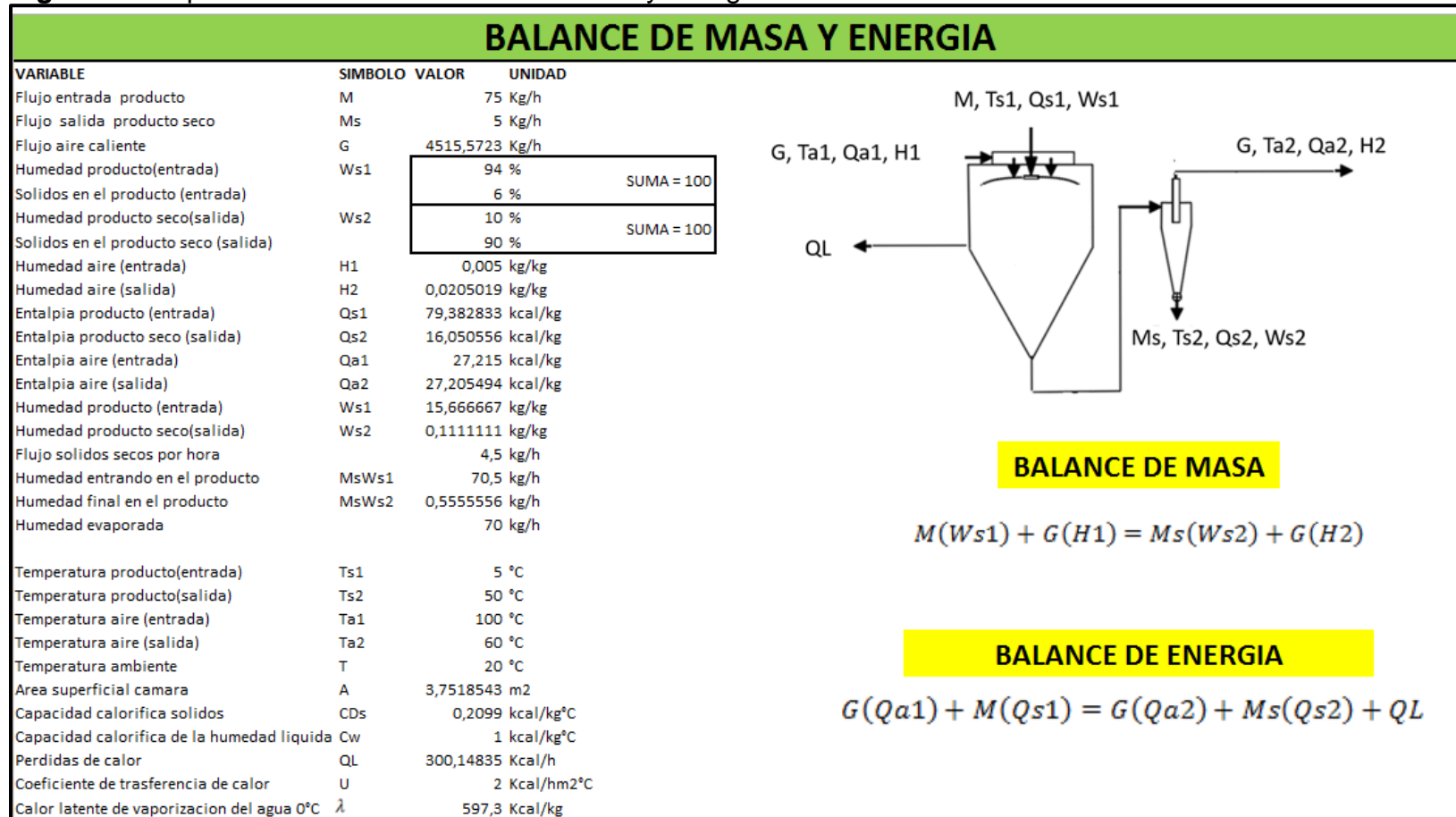


Figura 32. Datos finales del balance de masa y energía.

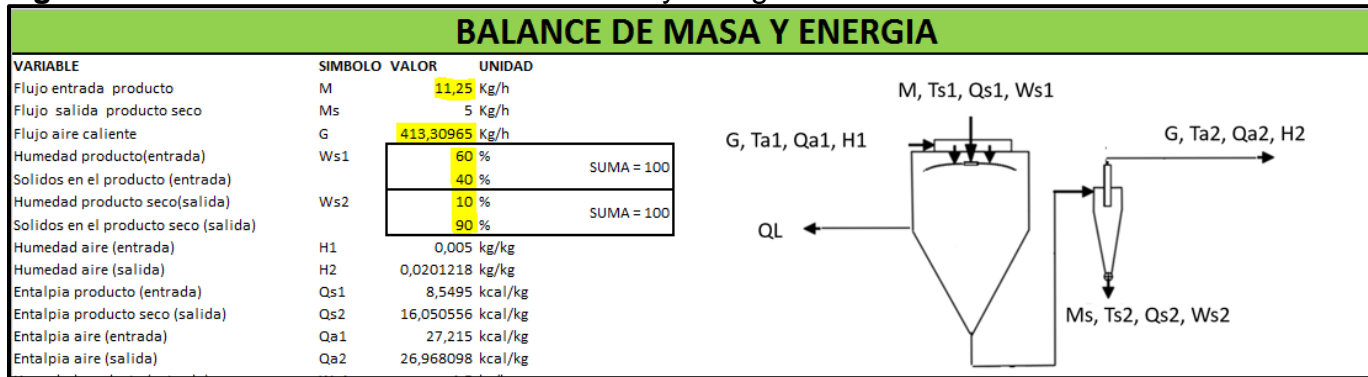
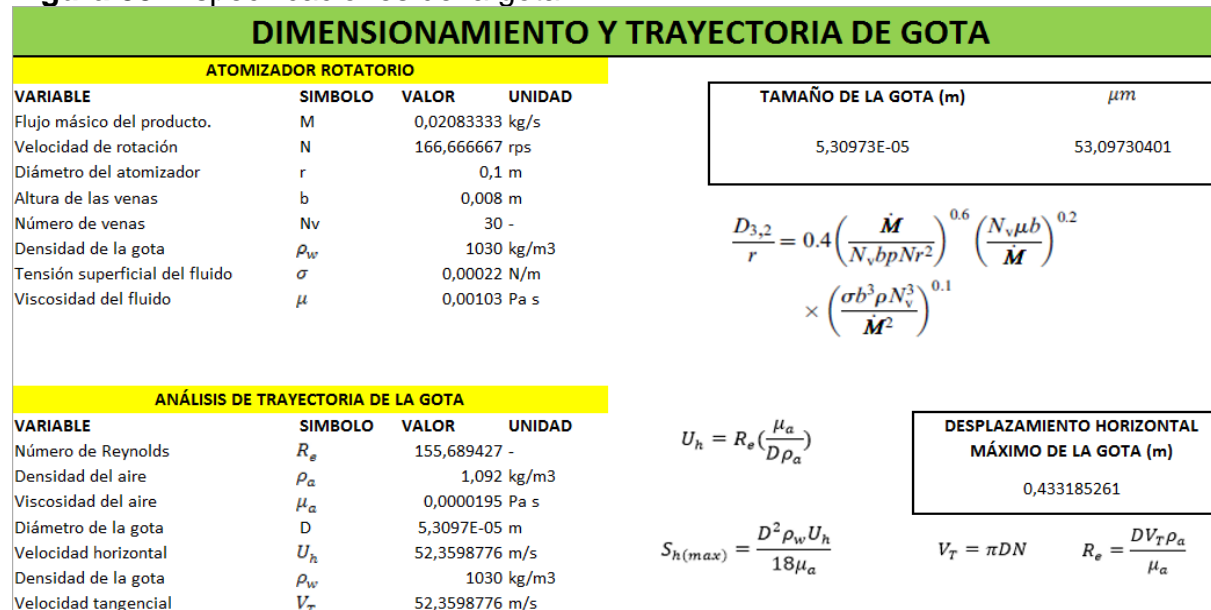


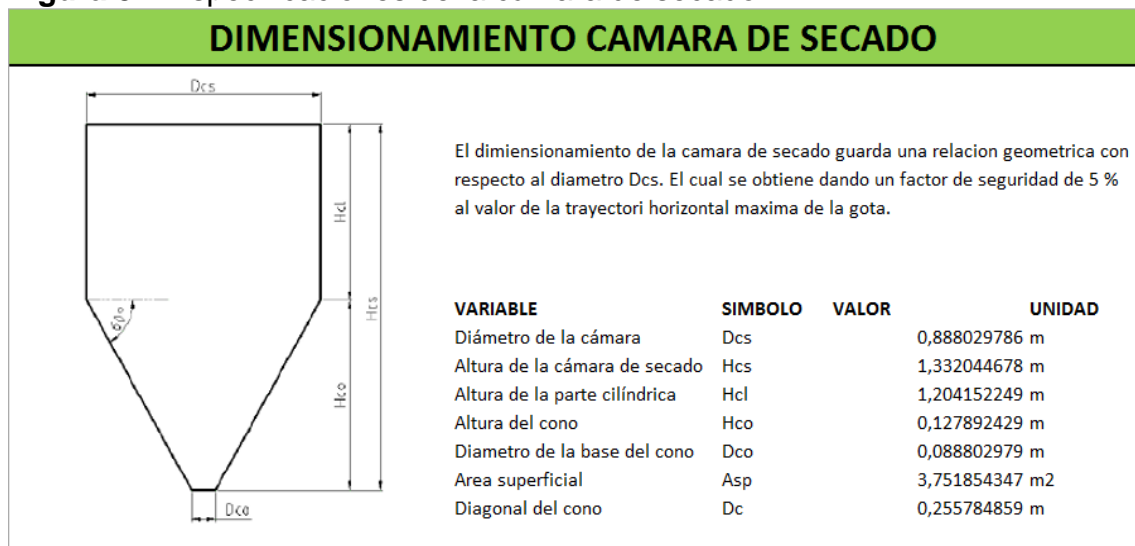
Figura 33. Especificaciones de la gota.



#### 4.4 CÁMARA DE SECADO

En la **Figura 34** se muestra la cuarta hoja que compone el libro. Cámara de secado, en la cual se hicieron los cálculos correspondientes al dimensionamiento de la misma. El diámetro fue calculado dando un factor de seguridad del 5% al desplazamiento horizontal máximo de la gota obtenida en el proceso anterior. Con respecto a las dimensiones de altura total de la cámara, el diámetro inferior del cono y la altura del cono guardan una relación geométrica con respecto al diámetro. En la **Figura 34** se muestra que con respecto al ejemplo planteado, se determinó que la cámara de secado óptima para encerrar las gotas atomizadas 0,88 m de diámetro

**Figura 34.** Especificaciones de la cámara de secado.



## 5. CONCLUSIONES

- Como resultado de la revisión bibliográfica se determina que no se conocen las propiedades fisicoquímicas del crudo de almidón de Quinoa como lo son, la densidad, viscosidad, tensión superficial, porcentaje de humedad ideal y capacidad calorífica de los sólidos.
- De acuerdo a los autores consultados se identificó que el proceso de extracción de almidón a partir de la semilla de Quinoa no se encuentra normalizado, es por esto que cada uno propone condiciones de operación y ambientes distintos como lo son temperaturas y tiempos de permanencia en la etapa de secado.
- Se identificó que los procesos de secado de almidón de diferentes fuentes como lo son la yuca el plátano y el maíz no pueden ser la base para la elección de un método correcto de secado de almidón a partir de la semilla de Quinoa, ya que la granulometría varía significativamente, siendo un parámetro importante en el dimensionamiento de los equipos y tiempos de operación.
- Aunque no se cuenta con la caracterización del crudo ni del producto final, se tiene un estimado de acuerdo a la revisión bibliográfica de la granulometría del almidón obtenido a partir de la semilla de Quinoa, es por esto que la tecnología spray dryer es la más adecuada para el proceso de secado.
- Debido al tiempo de permanencia de las partículas de almidón en la cámara de secado, el medio de transferencia de calor y la superficie de secado obtenida por la atomización, se estima que no se presentarán los comportamientos de retrogradación y gelatinización en la etapa de secado.
- De acuerdo a la hoja de cálculo formulada, se identificó que para valores de un porcentaje de humedad elevados en el crudo de almidón con respecto al porcentaje de sólidos en suspensión, el flujo de aire caliente requerido es alto y éste es proporcional al dimensionamiento de los equipos principales como el ciclón y la cámara de secado.
- En relación a las pruebas hechas por medio de la hoja de cálculo, se encontró que factores como la viscosidad dinámica, densidad y tensión superficial del crudo así como también las revoluciones a las que gira el atomizador determinan el tamaño del producto final, es decir, cuando los valores de las propiedades del crudo son altos, el tamaño de partícula del producto final es mayor; si las revoluciones de operación aumentan, el tamaño de ésta disminuye.



## 6. RECOMENDACIONES

- Para lograr un correcto diseño de un equipo para el secado de crudo de almidón se debe hacer una estricta caracterización del mismo determinando:

### **Producto Seco (almidón)**

- Tamaño de gota.
- Humedad deseada.
- Temperatura deseada a la salida.

### **Producto Húmedo (crudo de almidón)**

- Capacidad calorífica de sólidos.
- Capacidad calorífica de líquidos.
- Densidad de la mezcla.
- Viscosidad de la mezcla.
- Tensión superficial.
- Calor latente de vaporización del agua.
- Temperatura de entrada.
- Humedad

### **Aire**

- Humedad.
- Densidad.
- Viscosidad.

- Con respecto a un escalamiento a planta piloto y procesos industriales haciendo uso de la tecnología tipo spray dryer se debe tener en cuenta los diferentes atomizadores que se pueden usar y de esta manera hacer el correcto dimensionamiento de los equipos así como también los posibles flujos de operación.

## BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN, M. Freddy y DUFOUR, Domonique. ALMIDON AGRIO DE YUCA EN COLOMBIA TOMO 1: Producción y Recomendaciones. 2002nd ed. Cali, Colombia: Artes Gráficas, CIAT, 1998. 48 p. ISBN 958-9439-67-5

Apaza Vidal, et al. CATÁLOGO DE VARIEDADES COMERCIALES DE QUINUA EN EL PERÚ.

ARZAPALO QUINTO, Doyla, et al. Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) negra collana, pasankalla roja y blanca junín. En: REVISTA DE LA SOCIEDAD QUÍMICA DEL PERÚ. vol. 81, no. 1, p. 44-54.

BAYVEL, L. P. y AND ORZECOWSKI, Z. Liquid Atomization. Washington, DC.: Taylor & Francis, 1993.

BERNAL BUSTOS, Claudio Raúl, et al. CARACTERIZACIÓN DE GRANULOS DE ALMIDÓN NATIVO DE QUINUA POR IR-ATR, MEB, DRX.

BOHORQUEZ ARIZA, HERNANDO ENRIQUE. Maquinaria Equipos De Alimentos. [Electronic (1)]. [Consultado el 05/012016]. Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion\\_50\\_seca\\_dores.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion_50_seca_dores.html).

CHEN, Xiao Dong; BHANDARI, Bhesh y PATEL, Kamlesh. Spray Drying of Food Materials. Drying Technologies in Food Processing. Blackwell, 2007. 113 p.

ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. Diseño Optimo de Ciclones. En: REVISTA INGENIERIAS. julio-diciembre. vol. 5, p. 123.

FAO, Departments and Offices. Fichas Técnicas Equipos De Procesamiento De Alimentos. [Electronic(1)]: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/inpho/documents/EQUIPOS.pdf>:

FAO, Departments and Offices. Año Internacional De La Quinoa. [Electronic(1)]. [Consultado el 05/012016]. Disponible en: <http://www.fao.org/quinoa-2013/what-is-quinoa/use/es/>

FILKOVA, Iva; HUANG, Li Xing y MUJUMDAR, Aruns S. Industrial Spray Drying Systems. En: [Anónimo] Handbook of Industrial Drying. 215 p.

[Anónimo] Gelatinización y Retrogradación Del Almidón. [Electronic(1)]. [Consultado el OCTUBRE 92015]. Disponible en: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Seminario-Gelatinizacionyretrogradacion\\_25483.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Seminario-Gelatinizacionyretrogradacion_25483.pdf).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá: ICONTEC, 2008. 14 p. (NTC – 1486).

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. Bogotá: ICONTEC, 2008. 38 p. (NTC – 5613).

\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Bogotá: ICONTEC, 1998. 27 p. (NTC – 4490).

MASTER, Keith. Spray Drying Handbook. quinta ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991. 720 p. ISBN 0-470-21743-X.

MEJIA BURGOS, ANDRES y ACOSTA HURTADO, FELIPE. Condiciones De Operación De Un Secador De Rodillos En La Deshidratación De Residuos De Tomate (*Lycopersicum Esculentum* Mill).

SADIKOGLU, H. Spray Freeze Drying. En: WOO, M.; MUJUMDAR, Aruns S. y DAUD, W. Spray Drying Technology. Volumen 1 ed. 157 p.

SEI, Contreras Ingeniería. [Electronic(1)]. [Consultado el Septiembre 22015]. Disponible en: <http://seicontreras.com/es/equipos/>

WANG, Li y ZHU, Fan. Physicochemical properties of quinoa starch. En: CARBOHYDRATE POLYMERS. 15/10/2015.

WESTERGAARD, Vagn. Secado Por Atomizacion. En: Tecnologia De La Leche En Polvo Evaporacion y Secado Por Atomizacion. Copenhague: 2004. p. 69.

YANZA HURTADO, Erik Germán. Diseño De Un Secador Por Atomización a Nivel Piloto Para Jugo Concentrado De Tomate De Árbol. Sede Manizales Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química Ingeniería Química.: Universidad Nacional, 2003.